



Acta Agronómica

Vol 73 (1)

enero - marzo 2024 / january - march 2024

ISSN 0120 - 2812

e-ISSN 2323-0118



73-1

Sede
Palmira



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Comité Editorial / Editorial Board

Joel Tupac Otero Ospina

Editor Jefe / in Chief

Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira, Colombia
jtotoero@unal.edu.co

America Josefina Quintero Chacón

Universidad Nacional del Táchira, Venezuela
americajquintero@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-9377-7086>

Arcangelo Loss

Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil
arcangelo.loss@ufsc.br
<http://orcid.org/0000-0002-3005-6158>

Felipe Rafael Garcés Fiallos

Universidad de Guayaquil, Ecuador
felipegarces23@yahoo.com
<http://orcid.org/0000-0002-1795-4439>

Francisco Cruz Sosa

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, México
cuhp@xanum.uam.mx
<http://orcid.org/0000-0002-7127-7264>

Gisella S. Cruz García

Oxfam Novib, La Haya, Países Bajos
gisella.cruzgarcia@oxfamnovib.nl
<http://orcid.org/0000-0002-2699-3157>

Juan Humberto Avellaneda Cevallos

Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador
juan.avellaneda@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-1805-4803>

Javier Antonio Benavides Montano

Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira, Colombia
abenavidesm@unal.edu.co
<http://orcid.org/0000-0003-3247-5994>

Joel Tupac Otero Ospina

Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira, Colombia
jtotoero@unal.edu.co
<http://orcid.org/0000-0002-0810-183X>

John Ocampo

Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira, Colombia
jaocampop@unal.edu.co
<http://orcid.org/0000-0002-2720-7824>

José Luis Chávez Servia

Instituto Politécnico Nacional, México
jchavez@ipn.mx
<http://orcid.org/0000-0002-8816-4127>

Luis Carlos Martínez

Universidad Federal de Viçosa-MG, Brasil
lc.martinez@outlook.com
<http://orcid.org/0000-0001-7741-2984>

Luis Fernández Portillo

Universidad de Loyola, Andalucía, España
portillo@uloyola.es
<http://orcid.org/0000-0001-7152-5267>

Maia Fradkin

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de Argentina, Argentina
maiafradkin@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-1575-7634>

María Aurora Londoño Avendaño

Universidad de Valle - Santiago de Cali, Colombia
maria.avendano@correounivalle.edu.co

María del Mar Delgado Serrano

Universidad de Córdoba Escuela T.S. de Ingeniería Agronómica y Montes, España
mmdelgado@uco.es
<http://orcid.org/0000-0003-0171-6097>

María Fernanda Quintero Castellanos

Universidad autónoma de san Luis Potosí, México
mfquintero@unal.edu.co
<http://orcid.org/0000-0002-9130-0679>

Marinaldo Divino Ribeiro

Universidad Autónoma de Barcelona, CREA, Brasil
fgojedac@unal.edu.co

Mercedes del Río Celestino

Instituto de Investigación y Formación Agraria y pesquera (IFAPA), España
mercedes.rio.celestino@juntadeandalucia.es
<http://orcid.org/0000-0001-9130-2669>

Patrick Lavelle

Universidade Federal de Viçosa-MG, Brasil
plavelle48@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0002-2127-1067>

Pedro Mercado Ruaro

Instituto de Biología, UNAM, México
mruaro@ib.unam.mx

Ramón Díez Matallana

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú
rdiez@lamolina.edu.pe
<http://orcid.org/0000-0001-8247-1452>

Sérgio Ruffo Roberto

Universidade Estadual de Londrina, Brasil
sroberto@uel.br
<http://orcid.org/0000-0003-2357-187X>

Silvia López Ortiz

Colegio de Posgraduados, Campus Veracruz, México
silvalopez@colpos.mx
<http://orcid.org/0000-0002-5202-3365>

Código QR sitio web





Comité Científico / Scientific Committee

Juan Pablo Martínez Dávila

COLPOS, Colegio de Posgraduados, Veracruz, Estado de Veracruz, México.
jpmartin@colpos.mx

Julián Ramírez Villegas

Centro Internacional de Agricultura Tropical. Palmira, Valle del Cauca, Colombia
j.r.villegas@cgiar.org
<http://orcid.org/0000-0002-8044-583X>

Félix Hernández Hernández

Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas (IUPA) Universitat Jaume I Castellón, España
hernandf@uji.es
<http://orcid.org/0000-0003-1268-3083>

Charlotte Poschenrieder Wiens

Universidad Autónoma de Barcelona, España.
charlotte.poschenrieder@uab.cat

Pablo Rafael Speranza Gastaldi

Universidad Nacional Autónoma de México, México.
mruaro@ib.unam.mx
<http://orcid.org/0000-0003-3457-0151>

Daniel Debouck

Centro Internacional de Agricultura Tropical – CIAT, Palmira-Valle, Colombia
d.debouck@cgiar.org

Margarida L R Aguiar-Perecin

Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". (ESALQ)/Universidade de São Paulo, Brasil
mlrapere@usp.br

Paulo Roberto Da Silva

Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil
prsilva@unicentro.br

Andrea Liliana Clavijo McCormick

Max Planck Institute for Chemical Ecology, Germany. University Ökologie. Zürich, Schweiz
andrea.clavijo@usys.ethz.ch

Gisella Susana Cruz García

CIAT. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Palmira, Valle del Cauca, Colombia
g.s.cruz@cgiar.org

Idupulapati M. Rao

Centro Internacional de Agricultura Tropical. Palmira, Valle del Cauca, Colombia
i.rao@cgiar.org
<http://orcid.org/0000-0002-8381-9358>

Mercedes del Rio Celestino

Instituto de Investigación y Formación Agraria y pesquera (IFAPA). La Mojonera, Almería-España
mercedes.rio.celestino@juntadeandalucia.es
<http://orcid.org/0000-0001-9130-2669>

Marcelo Guerra

Universidade Federal de Pernambuco, Brasil
mguerra@ufpe.br
<http://orcid.org/0000-0003-1438-9742>

Código QR sitio web



Misión / Mission

Revista Acta Agronómica

Misión: Misión: La revista Acta Agronómica, editada trimestralmente por la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, publica artículos científicos en español e inglés, de trabajos en los ámbitos de las Ciencias Agrarias y del Desarrollo Rural Sostenible, de autores afiliados a organizaciones educativas e investigativas de Colombia, de las naciones de la Comunidad Andina, de América Latina, del Caribe y de Iberoamérica. Los artículos de revisión se escriben a solicitud del Comité Editorial de la revista. Las opiniones son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Envío de documentos y correspondencia: actagronomica_pal@unal.edu.co

Redacción de manuscritos: En esta edición se publica la Guía Abreviada para la redacción de manuscritos. Al documento "Instrucciones a los Autores" se puede acceder en el sitio web: www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica

Reproducción de artículos: Se autoriza la fotocopia de artículos para fines académicos citando la fuente.

Acceso en línea: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica

Indexada: ISI (Web of Science), SCOPUS, SciELO, Redalyc, Qualis (CAPES), Dialnet, DOAJ (Directory of Open Journal Access), e-Revistas, Publindex (Colciencias), entre otros. | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 / Impresión: Image Impresores, Colombia, 100 ejemplares, Julio de 2015

Acta Agronómica Journal

Mission: Mission: Acta Agronomica Journal, edited quarterly by National University of Colombia, campus Palmira, publishes scientific papers in Spanish and English, in Agricultural Sciences, Agroindustry, Environment and related areas, resulting of research of authors associated to education and research institutions from different countries. Reviews are written and published by the journal Editorial Board or editor in chief invitation. Opinions are of exclusive responsibility of the authors.

Documents and correspondence can be send to: actagronomica_pal@unal.edu.co.

Document preparation: an abbreviated guide is published in this edition. To access Authors Instructions complete guide, go to the website www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica

Article reproduction or copy: Copies with academic aims are authorized with source citation.

On line access: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica.

Indexed in: ISI (Web of Science), SCOPUS, SciELO, Redalyc, Qualis (CAPES), Dialnet, DOAJ (Directory of Open Journal Access), e-Revistas, Publindex (Colciencias), among others. | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 / Printed 100 copies by Image Impresores, Cali, Colombia, July 2015.

Revista Acta Agronómica

Missao: a revista Acta Agronómica, editada trimestralmente pela Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, publica artigos científicos resultados de pesquisas em Castelhana e Inglês, nos âmbitos das Ciências Agrárias, Agroindustriais, Ambientais e outras áreas afins, de autores associados a entidades de educação e de pesquisa de países em geral. Os artigos de revisão são escritos por solicitação do Comitê Editorial ou do(a) editor (a) chefe da revista. As opiniões são de exclusiva responsabilidade dos autores.

Documentos e correspondências: actagronomica_pal@unal.edu.co.

Preparação de documentos: Nesta edição, ou no site www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica se pode acessar o guia abreviado para a redação dos documentos, "Instruções para os Autores", e as intruções do OJS (Open Journal System).

Produção ou cópias: Estão autorizadas fotocópias dos artigos para fins acadêmicos, citando a fonte. A aceitação de publicidade não implica aprovação nem o respaldo dos respectivos produtos ou serviços por Acta Agronómica, nem pela Universidad Nacional de Colombia.

Acesso em linha: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica.

Indexada em: ISI (Web of Science), SCOPUS, SciELO, Redalyc, Qualis (CAPES), Dialnet, DOAJ (Directory of Open Journal Access), E-Revistas, Publindex (Colciencias), entre outros. | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 / Impressos 100 exemplares por Image Impresores, Cali, Colombia, julho de 2015.

Comité Técnico / Technical Board



Coordinadora editorial
Supervisión:
Corrección de estilo:
Diseño y diagramación:
Marcación XML:

Selene Alarcón Vásquez
Joel Tupac Otero Ospina
Julian Naranjo Guevara
Alexander Pereira Mosquera
José Raniere Correa Cárdenas

Créditos fotografía:

Foto: Alexander Pereira Mosquera
Foto primer plano semilleros de limón.

Nota:

Foto realizada en el municipio de Candelaria, Valle.

Guía abreviada para preparación de documentos / Brief guide for document preparation

Guía abreviada para preparación de documentos

Tipos y características de los documentos: Los trabajos sometidos a publicación no podrán someterse a otra revista mientras dure el proceso de revisión. Los errores de ortografía y la omisión de normas de presentación de documentos según la política editorial de Acta Agronómica son causales de rechazo.

Artículo científico: Presenta los resultados de investigación científica basada en hipótesis teórica o experimental, que signifique un aporte original al conocimiento. Relata la manera de delimitar la pregunta de investigación, el camino para someterla a prueba (análisis estadístico del experimento, protocolos disciplinarios) y la confrontación de los datos generados con la literatura actual. El rango aceptable para la configuración del documento es de 3500 hasta de 5000 palabras y hasta 20 referencias bibliográficas, incluyendo títulos (en el idioma original y en inglés), resumen (hasta 250 palabras), palabras clave, introducción, materiales y métodos, resultados, discusión y referencias bibliográficas.

Artículo de revisión: Será enviado a la revista únicamente por invitación directa del comité editorial o editora jefe de Acta Agronómica. Contiene el resultado de trayectorias dedicadas a la investigación o temas de frontera en las áreas de interés de la revista. Los límites máximos del documento son 10.000 palabras y hasta 80 referencias bibliográficas, incluyendo título (idioma original e inglés), resumen, abstract, introducción, capítulos, subcapítulos y referencias bibliográficas.

Preparación y formato del documento:

- Software Microsoft Office Word (Documento de Word 97-2003). Fuente Bookman Old Style, 14 para títulos, 12 para texto.
- Ajuste del documento al tamaño de papel carta (21.5 x 27.9 cm) y márgenes de 2.5 cm.
- Digite a doble espacio a través de todo el texto (incluyendo tablas y figuras).
- Palabras claves y key words deben ir ordenadas alfabéticamente. No repetir palabras del título.
- Únicamente usar la designación de Tabla y Figura (2000 x 1200 px, resolución 300 dpi, formato jpg, png)
- Los agradecimientos son opcionales y pueden contener máximo 30 palabras
- Para las referencias bibliográficas usar el estilo de la American Psychological Association (APA). No utilizar referencias como tesis, folletos, cartillas, resúmenes de congresos o eventos científicos.
- La revista adopta el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Envío de documentos: El envío de documentos es responsabilidad del autor para correspondencia y se realiza exclusivamente a través de la plataforma Open Journal System, página web de Ac Ag, http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica.

Brief guide for document preparation

Types and characteristics of documents: The papers submitted to publication may not submit to another journal while the review process. Spelling errors and omission of document presentation rules according to the Acta Agronomica editorial policy are grounds of non- acceptance.

Scientific article: Presents the results of science research based in theoretical or experimental hypothesis that means an original contribution to knowledge. Describe the way to delimit the research question, the road to carry out the evaluation (the experiment statistical analysis, disciplinary protocols) and the data confrontation generated with the current literature. The configuration document acceptable range is from 3500 words to 5000 words and until twenty (20) bibliographic references, including titles (in original language and English title), abstract (250 words), key words, introduction, materials and methods, results and discussion and bibliographic references.

Review article: Will be submit to the journal only by direct invitation of the Acta Agronomica editorial board or chief editor. Contains the result of the dedicated paths to the research or border issues in the areas of interest of the journal. The maximum limits of the document are 10.000 words and 80 bibliographic references including title (original language and English title), abstract, key words introduction, chapters, bychapters and bibliographic references.

Document preparation and format:

- Software Microsoft Office Word (Word document 97-2003). Bookman Old Style, 14 for titles, 12 for text.
- Set document to letter size paper (21.5 x 27.9 cm) and 2.5 cm margins.
- Type double-spaced throughout the text (including tables and figures).
- Key words must be order alphabetically, do not repeat any title words.
- Use Table and Figure designation (2000 to 1200 px, resolution 300 dpi, format jpg, png).
- Acknowledgments are optional and can contain up to 30 words.
- For the bibliographic references, use the American Psychological Association (APA) style. No use references as thesis, pamphlets, brochures, summary congress and scientific events.
- The journal adopts the International System of Units (IS).

Article submission: Document submit is responsibility of the corresponding author and it is performed exclusively through the Open Journal System platform.

Ac Ag website: http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica.

Contenido* / Content

Pag.

Propiedades funcionales, físicoquímicas y sensoriales de una bebida láctea fermentada con adición de auyama (<i>Cucurbita maxima</i>) y almidón de maíz (<i>Zea mays</i>) Functional, physicochemical, and sensory properties of a fermented dairy beverage added with pumpkin (<i>Cucurbita maxima</i>) and corn starch (<i>Zea mays</i>) María Camila Rodríguez Lora, José Uriel Sepúlveda Valencia, Carlos Julio Márquez Cardozo.	7
Respuesta germinativa y desarrollo fisiológico <i>in vitro</i> de <i>Guazuma crinita</i> Mart. a partir de semillas sexuales In vitro germination response and physiological development of <i>Guazuma crinita</i> Mart. from sexual seeds Antony Cristhian Gonzales-Alvarado, Rayme Roxana Tuanama Pinchi, Carlos César Arévalo-Salles Jorge Arturo Mori-Vásquez, Jesús Selim-Bardales, Jorge Manuel Revilla-Chávez, Jorge Washinton Vela Alvarado, Marx Herrera-Machaca, Nathalia de Setta.	16
Compuestos fenólicos obtenidos de Chile (<i>Capsicum</i> sp.) para el control de la oxidación y el deterioro bacteriano en la carne y en productos cárnicos: revisión Phenolic compounds obtained from chili pepper (<i>Capsicum</i> sp.) for the control of oxidation and bacterial spoilage in meat and meat products: A review Alfredo Varela-Esquer, Saul Ruiz-Cruz, Luis A. Cira-Chávez, María Isabel Estrada-Alvarado, Enrique Márquez-Ríos, Martín Valenzuela Melendres.	25
Nuevos registros de Pucciniales (Fungi) y de hospedantes parasitados por royas sobre la familia Poaceae en Colombia New records of Pucciniales (Fungi) and hosts parasitized by rusts on the Poaceae family in Colombia Sara Aguirre-Manco, Mauricio Salazar-Yepes.	40
Chemical composition of <i>Pennisetum purpureum</i> silages with inclusion of dehydrated <i>Bixa orellana</i> residue Composición química de ensilajes de <i>Pennisetum purpureum</i> con inclusión de residuo deshidratado de <i>Bixa orellana</i> Bruno Rafael Santos Borges, Lucien Bissi da Freiria, Túlio Otávio de Jardim D'Almeida Lins, Emerson Silva Miranda, Alan Andrade Mesquita, Fagton de Mattos Negrão.	49
Detección por RT-LAMP del Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV, <i>Tobamovirus fructugosum</i>) en semillas de tomate en Colombia RT-LAMP detection of Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV, <i>Tobamovirus fructugosum</i>) in tomato seeds in Colombia Juan Pablo Bados, Juliana Sánchez, Salvatore Davino, Stefano Panno Mauricio Marín.	55
Prospective analysis of the agricultural trade relations between Peru and India from 2019 to 2023 before the free trade agreement Análisis prospectivo de las relaciones comerciales agrícolas entre Perú e India de 2019 a 2023 antes del tratado de libre comercio Alberto Luis Pantaleón Santamaría, José Carlos Montes Ninaquispe, Richard Ignacio Montes Tocto, Billy Heinrich Maco Elera, Ingrid Isabel Medina Cardozo, Halina Razuri Rubio.	66
Harnessing agro-industrial waste for cellulose extraction and biodegradable packaging production: a study from the Peruvian Amazon Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la extracción de celulosa y la producción de envases biodegradables: un estudio desde la Amazonía peruana Grober Panduro Pisco, Lady Di Hoyos Shica, Edwar Edinson Rubina, Glendy Sánchez Sunción, Gustavo Nilo Panduro Rocha, David Leon Moreno, Dalia Carbonel	73
Pronóstico para la producción de cebolla de rama a partir de un modelo VAR Forecast scallion production based on a VAR model Carlos Andrés Chaparro Arias, Juan Carlos Ruiz Torres, Gina Paola Fonseca Cifuentes	82
Temporal variation of soil acidity attributes in cocoa-growing areas Variación temporal de los atributos de acidez del suelo en zonas cacaoteras Ádson dos Santos Oliveira, José Olímpio de Souza Júnior, Júlio César Lima Neves, José Augusto dos Santos Neto, Dário Ahnert.	92
Determinación de las necesidades hídricas de <i>Carica papaya</i> L. en los híbridos Paulina y Tainung mediante teledetección Determination of the water requirements of <i>Carica papaya</i> L. in the Paulina and Tainung hybrids using remote sensing María Mercedes Bermeo Vargas, Enrique Alejandro Torres Prieto, Yuri Peralta.	99
Dominancia de <i>Dichondra sericea</i> y diversidad arvense mediante manejo manual en cultivo de banano orgánico en Ecuador Dominance of <i>Dichondra sericea</i> and weed diversity under manual management in organic banana cultivation in Ecuador Santiago Sánchez Tigrero, Juan Moreira Castro, Luz García Cruzatty.	107

Código QR sitio web

http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica

Propiedades funcionales, fisicoquímicas y sensoriales de una bebida láctea fermentada con adición de auyama (*Cucurbita maxima*) y almidón de maíz (*Zea mays*)

Functional, physicochemical, and sensory properties of a fermented dairy beverage added with pumpkin (*Cucurbita maxima*) and corn starch (*Zea mays*)

Maria Camila Rodríguez Lora ^{1,2}, José Uriel Sepúlveda Valencia ^{1,3}, Carlos Julio Márquez Cardozo ^{1,4}.

¹Universidad Nacional de Colombia. Colombia. ²  maria.rodriguez@unal.edu.co; ³  josepul@unal.edu.co; ⁴  cjmarque@unal.edu.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.114969>

2024 | 73-1 p 7-15 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-06-11 Acep.: 2024-11-20

Resumen

Las bebidas lácteas fermentadas (BLF) han dado respuesta a la creciente demanda de productos que se caracterizan por su valor funcional, agradable sabor y beneficios para la salud del consumidor. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la concentración de la harina de semilla de auyama (HSA, 1.5; 2.0 y 2.5 %), pulpa de auyama (PA, entre 6.0 y 8.0 %) y almidón modificado de maíz (AMM, entre 0.4 y 0.7 %), sobre las propiedades funcionales, fisicoquímicas y sensoriales de una BLF a base de lactosuero dulce. Cada bebida se evaluó mediante pH, acidez, sólidos solubles totales (SST), coordenadas CIEL*a*b*, sinéresis, potencial zeta (ζ), viscosidad y atributos sensoriales. Los resultados mostraron que con la adición de 1.5 % de HSA en la BLF se obtuvo la mayor puntuación en sabor y aceptabilidad general por parte de los consumidores. El aumento de la concentración de PA provocó un efecto significativo en los valores de ζ y L^* , reduciendo el umbral de aglomeración y favoreciendo la percepción del color amarillo de la BLF, asociada a la pigmentación de los carotenoides. La formulación óptima se obtuvo con una concentración de PA al 8.4 % y AMM al 0.3 %, resultando estable fisicoquímicamente y siendo el tratamiento más aceptable desde el punto de vista sensorial. El producto obtenido proporciona fibra y ácidos grasos esenciales que mejoran el perfil funcional del alimento y lo convierten en una alternativa tecnológica para agregar valor al lactosuero dulce, coproducto de la industria quesera.

Palabras clave: atributos sensoriales, harina de semilla de auyama, leche fermentada, pulpa de auyama, suero dulce.

Abstract

Fermented milk beverages (BLF) have responded to the growing demand for products that offer functional value, pleasant taste, and health benefits to the consumers. The objective of this research was to evaluate the effect of the concentration of pumpkin seed flour (HSA, 1.5, 2.0, and 2.5 %), pumpkin pulp (PA, between 6 and 8 %), and modified corn starch (AMM, between 0.4 and 0.7 %), on the functional, physicochemical, and sensory properties of a BLF based on sweet whey. The beverages were evaluated for pH, acidity, total soluble solids (TSS), CIEL*a*b* coordinates, syneresis, zeta potential (ζ), viscosity, and sensory attributes. The results showed that the addition of 1.5 % HSA to BLF resulted in the highest score for taste and consumer acceptability. Increasing in the concentration of PA had a significant effect on the values of ζ and L^* , reducing the agglomeration threshold and favoring the perception of the yellow color of the BLF, associated with carotenoid pigmentation. The optimal formulation was obtained with a concentration of 8.4 % PA and 0.3 % AMM, resulting in a physicochemically stable and the most acceptable treatment from a sensory point of view. The product obtained provides fiber and essential fatty acids that improve the functional profile of the food and make it a technological alternative to add value to sweet whey, a by-product of the cheese industry.

Keywords: fermented milk, pumpkin pulp, pumpkin seed flour, sensory attributes, sweet whey.

Introducción

A nivel mundial, la producción de bebidas lácteas fermentadas (BLF) ha registrado un notable crecimiento impulsado por la alta calidad de sus proteínas, la influencia positiva de los compuestos bioactivos, la simplicidad de su tecnología de producción y la creciente aceptación por parte de los consumidores (León-López *et al.*, 2020). Esta tendencia también está respaldada por el aprovechamiento eficiente del suero dulce de leche, un coproducto de alto valor biológico, pero con un bajo valor comercial, cuyo desecho sin el tratamiento adecuado genera un impacto ambiental negativo (Gutiérrez-Alzate *et al.*, 2023).

La formulación de la BLF requiere que la base láctea constituya el 51 % (p/p) y en ocasiones, el uso de suero de leche puede retardar la formación de gel en la fase de dispersión (Öztürk *et al.*, 2018). Sin embargo, se ha observado que los almidones modificados actúan como estabilizantes o espesantes, promoviendo una estructura de gel más uniforme (red proteica), disminuyendo la sinéresis y mejorando la viscosidad, lo que favorece las propiedades sensoriales de la bebida (Imbachí-Narváez *et al.*, 2019; Tsevdou *et al.*, 2020; Wong *et al.*, 2020).

Por otro lado, la incorporación de frutas a las leches fermentadas se ha posicionado como una estrategia prometedora para enriquecer matrices alimentarias con compuestos fitoquímicos, mejorando tanto su valor nutricional como sus propiedades funcionales (Bianchini *et al.*, 2020). Dentro de esta perspectiva, la auyama (*Cucurbita maxima*), producida típicamente en Colombia, se destaca como un ingrediente de alto interés, ya que su composición nutricional incluye carbohidratos de bajo peso molecular y micronutrientes esenciales como hierro, zinc y potasio (Cardozo *et al.*, 2021). Además, su pulpa amarilla contiene compuestos bioactivos como carotenoides, tocoferoles, y β -sitosterol, junto con vitaminas del complejo B, que la convierten en un ingrediente funcional versátil (Leichtweis *et al.*, 2023). Las semillas de auyama también complementan este perfil nutricional al contener fibra (47-52 %), proteína (8-20 %) y lípidos (22-64 %), dependiendo de la variedad. Estos lípidos poseen una alta proporción de ácidos grasos esenciales como oleico, linoleico y linolénico, que confieren a las semillas propiedades funcionales relacionadas con la salud cardiovascular y la actividad antioxidante (Amin *et al.*, 2019; Cuco *et al.*, 2019; Prommaban *et al.*, 2021).

En este contexto, la integración de almidón modificado de maíz, pulpa y harina de semilla de auyama en las BLF se perfila como una alternativa innovadora para satisfacer la creciente demanda de alimentos con propiedades funcionales, fisicoquímicas y sensoriales diferenciadas. Estudios previos han explorado la incorporación de pulpa de frutas en leches fermentadas, como guanábana,

anón, chirimoya, fresa y pitahaya, destacando su contribución de compuestos bioactivos y la mejora de atributos sensoriales como olor, color y sabor (Senadeera *et al.*, 2018; Jaster *et al.*, 2018; Díaz-Trujillo *et al.*, 2023). También se han empleado harinas de olivillo, amaranto, papa y moringa como fuentes de proteína, fibra y ácidos grasos esenciales, lo que incrementa la estabilidad electrostática de la bebida y su valor funcional (Öztürk *et al.*, 2018; Calvario-Palma *et al.*, 2019; Sun *et al.*, 2020; Saeed *et al.*, 2021). Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la adición de harina de semilla de auyama, pulpa de auyama y almidón modificado de maíz sobre las propiedades funcionales, fisicoquímicas y sensoriales de una bebida láctea fermentada tipo yogur a base de lactosuero.

Materiales y métodos

Las actividades de investigación se realizaron en los Laboratorios de Productos Lácteos y Frutas y Hortalizas de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, en el marco del proyecto titulado “Desarrollo de productos agroindustriales a partir de auyama (*Cucurbita maxima*) en miras a fortalecer la competitividad de la cadena”.

Materias primas

Las auyamas utilizadas en el estudio fueron cultivadas en el área rural del municipio de Dabeiba, Antioquia, Colombia, bajo condiciones edafológicas específicas. El suelo presentaba una textura franco-arcillosa, buen drenaje y un pH comprendido entre 5.5 y 6.5. El cultivo se desarrolló a una altitud promedio de 450 m s. n. m., con temperatura media de 26 ± 3 °C, una precipitación anual de $3.161 \text{ mm} \pm 170$ y humedad relativa de $82 \% \pm 7$. La leche entera y el lactosuero fueron suministrados por la empresa Auralac S.A.S., Colombia. El almidón modificado de maíz waxy fue provisto por Ingredion, Thermflo, Colombia, mientras que el citrato de sodio por Tecnas, Colombia. El cultivo iniciador para el proceso de fermentación, compuesto por bacterias ácido-lácticas como *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus salivarius* subsp. *bulgaricus*, fue aportado por Vivolac, DRI-SET 432, Colombia. Todos los solventes y reactivos químicos utilizados en los análisis fueron de grado analítico. Además, se empleó el estándar de mezcla de metil ésteres de ácidos grasos FAME MIX Supelco 37, de Sigma-Aldrich, para los análisis del perfil lipídico.

Obtención de la pulpa de auyama (PA)

Las auyamas (*Cucurbita maxima*) fueron seleccionadas según los requisitos de calidad definidos en la Norma Técnica Colombiana - NTC 1291 (ICONTEC, 1977). El material vegetal fue acondicionado con 100 ppm de hipoclorito de sodio, pelado, troceado en forma de cubos de 10 ± 0.5 g y sometido a cocción en baño

termostático (Memmert, WNB 14) a 80 °C durante 10 minutos manejando una relación 1:2 (vegetal : agua). La muestra fue drenada y se homogenizó en licuadora (Oster®). La pulpa presentó concentración de sólidos solubles totales (SST) entre 7 y 8 °Brix. La PA presentó un 92.7 % de contenido de humedad; 3.81 % de carbohidratos; 2.00 % de fibra dietaria; 0.68 % de proteína; 0.64 % de ceniza; 0.17 % de lípidos; 4.11 mg de β carotenos g^{-1} ; y 8 °Brix de sólidos solubles totales, de acuerdo con la evaluación previa realizada por Cardozo et al. (2021).

Obtención de harina de semillas de auyama (HSA)

La composición nutricional de la semilla de auyama correspondió a un 55 % de humedad; 16.1 % de proteína; 13.3 % de lípidos; 12.7 % de fibra dietaria; 2.1 % de cenizas y 0.2 % de carbohidratos (Cardozo et al. 2021). Las semillas se deshidrataron en un horno de convección forzada (Memmert, UF750) a 70 ± 2 °C con una velocidad de aire de $2.1 \pm 0.4 \text{ ms}^{-1}$, hasta alcanzar un contenido de humedad del 5.0 %. El material seco se pulverizó utilizando un molino de cuchillas (Hamilton Beach, 80350R) y fue tamizado con una tamizadora (JPS-LAB, TMZ-03) para obtener partículas de 600 μm (Malla n.° 30) (Cuco et al., 2019). La HSA se almacenó en bolsas multicapa laminadas (Pet/Foil/Pebd 120 micras) fabricadas por ALICO S.A., garantizando condiciones adecuadas de conservación.

Cuantificación de los ácidos grasos

La extracción de lípidos de la HSA se realizó empleando una mezcla de diclorometano/metanol como solvente. Al material filtrado se le añadieron 2.0 mL de cloruro de sodio al 0.7 %. Luego, la fase etérea se transfirió a un tubo de vidrio, donde el solvente fue evaporado.

Para la recuperación de los ácidos grasos de ésteres metílicos (FAMES) se añadieron 2.0 mL de hexano al tubo de vidrio. La fase superior obtenida se depositó en un vial para su análisis. La cuantificación de los FAMES se llevó a cabo utilizando un cromatógrafo de gases acoplado a un espectrómetro de masas (Shimadzu, GCMS-QP2010), equipado con una columna capilar DB-WAX (Agilent J&W, 3 m x 0.250 mm x 0,250 μ). El análisis se realizó inicialmente a 100 °C, con un incremento de $3.0 \text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ hasta alcanzar los 193 °C, manteniendo esta temperatura durante 4 minutos, seguido de un incremento de $1.5 \text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ hasta los 240 °C durante 10 minutos. El volumen de inyección fue de 1 μL , utilizando una relación de división (Split) de 3:1. La identificación de los ácidos grasos se basó en los tiempos de retención del estándar de mezcla de metil ésteres de ácidos grasos (FAME MIX). Los datos obtenidos fueron procesados mediante el software GCMS-solution. Los resultados se expresaron en gramos de ácidos grasos por 100 g de HSA en base seca (Leichtweis et al., 2023).

Desarrollo de la bebida láctea fermentada

Para la formulación de la bebida láctea fermentada (BLF), se empleó una mezcla de leche y lactosuero dulce en una relación 51/49 (Gutiérrez-Álzate et al., 2023). A esta mezcla se añadió almidón modificado de maíz (AMM) en concentraciones de 0.4 a 0.7 % (p/p) y citrato de sodio al 0.2 % (p/p) cuando la temperatura alcanzó los 45 °C, manteniendo una agitación constante. La mezcla se sometió a un proceso térmico, calentándose a 65 °C y homogenizándose a una presión de 10.3 MPa por 5 minutos. Posteriormente, fue pasteurizada a 85 °C durante 15 minutos. Una vez enfriada a 42 °C, se inoculó con el cultivo iniciador (3.0 %, p/p) y se incubó hasta alcanzar una acidez titulable de 0.6 %, lo que tomó aproximadamente 5 horas. Las muestras obtenidas se refrigeraron a 4 ± 1 °C durante 16 horas. A las bebidas se les incorporó 8.0 % (p/p) de sacarosa, entre 6.0 - 8.0 % (p/p) de pulpa de auyama (PA) y 1.5 % (p/p) de harina de semilla de auyama (HSA), mezclando manualmente los ingredientes. Las BLF fueron almacenadas a 4 ± 1 °C durante 48 horas, periodo en el cual se llevaron a cabo las evaluaciones de sus propiedades fisicoquímicas y sensoriales (Imbachí-Narváez et al., 2019). Las concentraciones específicas de PA y AMM aplicadas a las BLF están detalladas en la Tabla 3.

Evaluación de las propiedades fisicoquímicas

El pH de la BLF se midió utilizando un potenciómetro (HANNA, HI 2002), siguiendo el protocolo de la AOAC 981.12 (1990). La acidez titulable se determinó mediante el método volumétrico definido por la AOAC 947.05 (1990). Los sólidos solubles totales (SST) se cuantificaron con un refractómetro digital (HANNA, HI 96801), según el método AOAC 932.12 (1990). La evaluación del color se realizó con un colorímetro (Konica Minolta, CR-400) integrado con el software Spectra Magic NX, utilizando el iluminante D65 y el observador estándar de 2°. Los parámetros de color se expresaron en términos de L^* (luminosidad), a^* (cromaticidad verde-rojo) y b^* (cromaticidad azul-amarillo) (Bianchini et al., 2020).

Para medir la sinéresis (porcentaje de suero liberado), se centrifugaron 25 g de muestra a 5000 rpm durante 20 minutos a 5 °C, siguiendo la metodología propuesta por Gutiérrez-Álzate et al. (2023). El potencial zeta (ζ) se evaluó utilizando un Zetasizer (Malvern, ZS 90, Reino Unido) inyectando la muestra diluida en agua (relación 1:100) en una celda capilar de medición, conforme a lo descrito por Baississe y Fahloul (2018). La curva de flujo se obtuvo mediante un reómetro (Brookfield, DV-III Ultra) con un baño termostático a 4 °C, utilizando una geometría de cilindro concéntrico ULA (n.° SC4-21). La velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) se manejó en un rango de 0.020 a 120 s^{-1} y el valor de viscosidad (μ) se tomó como una media a 50.6 s^{-1} , siguiendo el enfoque propuesto por Tsevdou et al. (2020).

Evaluación de las propiedades sensoriales

La aceptabilidad sensorial de las BLF se evaluó mediante escala hedónica estructurada de 5 puntos (1: me disgusta mucho, 2: me disgusta, 3: ni me gusta ni me disgusta, 4: me gusta, 5: me gusta mucho), basado en la Norma Técnica Colombiana - NTC 3884 (ICONTEC, 1996). En ella participaron 90 panelistas no entrenados, con edades entre 16 y 60 años (promedio de 24 años), quienes valoraron atributos como olor, color, sabor y consistencia. Entre los participantes se incluyó personal administrativo y estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Cada panelista recibió vasos desechables de 45 mL con 30 g de la bebida, servida a una temperatura habitual de consumo (8-10 °C). Las muestras fueron codificadas con tres dígitos y distribuidas aleatoriamente para evitar sesgos de acuerdo con lo sugerido por Öztürk et al. (2018).

Diseño experimental y análisis estadístico

Los valores obtenidos para el perfil de ácidos grasos fueron expresados como el promedio de 2 lotes de HSA. El porcentaje de inclusión de HSA en la BLF se evaluó en 3 niveles: 1.5; 2.0 y 2.5 % (p/p), definidos como T1, T2 y T3, respectivamente. Estos niveles se evaluaron mediante análisis sensorial utilizando la prueba de Friedman para determinar significancia con un nivel de confianza del 95 %. Una vez fijado el porcentaje óptimo de HSA, se implementó un diseño central compuesto (DCC) aplicando la metodología de superficie de respuesta (RSM). Este diseño permitió 2 variables: la concentración de PA, establecida entre 6.0 y 8.0 % (p/p), y la concentración de AMM, que osciló entre 0.4 y 0.7 % (p/p) (Tabla 3). Las superficies de respuesta se calcularon utilizando la ecuación 1, permitiendo modelar las interacciones y optimizar las condiciones experimentales para maximizar las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de la BLF.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i < j=1}^2 \beta_{ij} X_i X_j \quad \text{Ec. (1)}$$

Donde y es la respuesta calculada por el modelo, β_0 , β_i y β_{ii} son los coeficientes de regresión para el intercepto, términos de interacción lineales y cuadráticos, respectivamente; X_i es la variable independiente correspondiente a PA y AMM. El ajuste de los modelos se determinó mediante análisis de regresión y el coeficiente de determinación (R^2). Igualmente, se realizó un ANOVA de medidas repetidas a un nivel de significancia de 0.05 para las propiedades fisicoquímicas y sensoriales; cuando estas fueron significativas se ejecutó la optimización simultánea de múltiples respuestas mediante la función de deseabilidad general (D), empleando el software estadístico Statgraphics Centurion XVI software (Versión 16.1.18).

Resultados

Perfil de ácidos grasos en la HSA

La Tabla 1 muestra el perfil de ácidos grasos presentes en la HSA. Los principales componentes identificados fueron los ácidos linoleico, oleico, palmítico y esteárico, los cuales representan el 98.6 % del total de los ácidos grasos analizados. Entre los ácidos grasos insaturados, el ácido linoleico fue el más abundante, seguido por el oleico, palmitoleico y linolénico. Todos los demás ácidos (mirístico, eicosadienoico, araquidónico y behénico) estuvieron presentes en cantidades inferiores al 0.5 %.

Evaluación sensorial de la bebida láctea con adición de HSA

El perfil sensorial para los tratamientos evaluados se presenta en la Tabla 2. La prueba de Friedman evidenció una preferencia significativa por el tratamiento T1 (1.5 % de HSA) en comparación con T2 (2.0 % de HSA) y T3 (2.5 % de HSA). En términos de consistencia, se encontraron diferencias significativas entre T1 y T3 ($p < 0.05$), con un 75 % de los panelistas que calificaron T1 como “Me gusta mucho”, mientras que T3 recibió mayoritariamente la calificación de “Me gusta”. Para los atributos de olor, color y sabor no se identificaron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados ($p > 0.05$). Cabe destacar que el tratamiento T1 obtuvo una puntuación promedio de 4 en todos los atributos, por lo que se seleccionó para continuar con la siguiente fase de la experimentación.

Características de calidad de la bebida láctea con adición de HSA, PA y AMM

Los datos experimentales (Tabla 3) permitieron determinar el coeficiente de determinación (R^2), la relación F del modelo y el valor P (Tabla 4). El modelo cuadrático no fue significativo ($p > 0.05$) para las características fisicoquímicas, como pH, acidez y SST, con la adición de PA y AMM (Tabla 3). El pH se mantuvo entre 4.2 y 4.5, los valores de acidez entre 0.6 y 0.7 % (expresados como ácido láctico) y los SST entre 13.7 a 16.6 °Brix.

Respecto a los parámetros de color, el modelo cuadrático no puede explicar la variabilidad de los datos ($p > 0.05$) para las coordenadas a^* y b^* con la adición de PA y AMM (Tabla 3). Sin embargo, para L^* , se identificó un modelo significativo ($p < 0.05$) descrito por la ecuación 2:

$$L = 334.2 - 68.1 \times PA - 132.1 \times AMM + 4.4 \times PA^2 + 11.4 \times PA \times AMM + 42.7 \times AMM^2 \quad \text{Ec. (2)}$$

El coeficiente de determinación (R^2) sugiere que el modelo explica el 51,8 % de variabilidad de los datos. La Figura 1(a) muestra una relación

cuadrática entre L^* y PA ($p = 0.026$), indicando que L^* tiende a maximizarse para valores extremos de PA. Las concentraciones óptimas de PA y AMM para un mayor valor de L^* (72.2) fueron 5.6 % y 0.3 %, respectivamente.

En cuanto a la sinéresis y viscosidad, el modelo cuadrático no fue significativo ($p > 0.05$) para explicar la variabilidad en función de las concentraciones de PA y AMM. Para la sinéresis, los valores obtenidos oscilaron entre 27.3 % y 37.3 %, mientras que para la viscosidad se registraron entre 50.9 y 159.5 MPa.s (Tabla 3).

Por otro lado, el potencial zeta (ζ), que describe la magnitud de la carga eléctrica de las partículas y se ha utilizado como un indicador de la carga superficial de la caseína coloidal, se modeló cuadráticamente ($p < 0.05$) mediante la ecuación 3:

$$\zeta = 54.4 - 6.9 \times PA - 141.3 \times AMM - 0.47 \times PA^2 + 23.0 \times PA \times AMM - 17.7 \times AMM^2 \quad \text{Ec. (3)}$$

El R^2 indica que el modelo podría explicar el 56.3 % de la variabilidad de datos. La Figura 1(b) muestra que, a medida que aumentó la concentración de PA y disminuyó la de AMM ($p = 0.003$), el valor del ζ de las BLF se redujo, oscilando entre -10 y -19 mV. Los resultados de la optimización indican que el ζ para una mayor estabilidad (-22.2) se estima en 8.4 % de PA y 0.3 % de AMM.

Tabla 1. Composición de ácidos grasos de harina de semilla de auyama

Ácidos grasos	Composición (%)
Ácido mirístico (C14:0)	0.413 ± 0.133
Ácido palmítico (C16:0)	21.9 ± 1.21
Ácido palmitoleico (C16:1)	0.221 ± 0.201
Ácido esteárico (C18:0)	11.9 ± 2.06
Ácido oleico (C18:1, Cis-9)	23.3 ± 3.21
Ácido linoleico (C18:2, Cis-9,12)	41.4 ± 1.39
Ácido linolénico (C18:3, Cis-9, 12, 15)	0.101 ± 0.025
Ácido eicosadienoico (C20:2, Cis-11,14)	0.112 ± 0.033
Ácido araquidónico (C20:4)	0.210 ± 0.043
Ácido behénico (C22:0)	0.431 ± 103
SFA	34.8 ± 0.752
MUFA	23.5 ± 0.701
PUFA	41.5 ± 1.70

Tabla 2. Calificación de atributos sensoriales por consumidores para la bebida láctea con adición de harina de semilla de auyama

Tratamiento	HSA (%)	Olor	Color	Sabor	Consistencia	Aceptabilidad general
T1	1.5	4.0 ^a	4.0 ^a	4.0 ^a	4.0 ^a	1042 ^a
T2	2.0	3.0 ^a	4.0 ^a	4.0 ^a	4.0 ^a	990 ^b
T3	2.5	3.0 ^a	4.0 ^a	4.0 ^a	3.0 ^b	964 ^b

*Valores con letras diferentes en la misma columna son diferentes significativamente ($p < 0.05$).

La evaluación sensorial de las BLF reveló que la mayoría de los panelistas calificaron las muestras con puntajes entre 3 y 4 en la escala hedónica, lo que corresponde a las categorías “ni me gusta ni me disgusta” y “me gusta”. Para los atributos de olor, sabor y consistencia, no se encontraron diferencias significativas entre las diferentes concentraciones de PA y AMM adicionadas ($p > 0.05$). Sin embargo, en cuanto al color, el modelo mostró una asociación lineal significativa ($p = 0.016$), indicando que una mayor concentración de PA mejoró la percepción de los panelistas (Tabla 5).

Optimización y validación del modelo

Para la validación de la BLF con las variables estadísticamente significativas ($p < 0.05$), las concentraciones óptimas de PA y AMM fueron 8.4 y 0.3 % (p/p), respectivamente. Los valores experimentales de ζ y color evaluado sensorialmente fueron congruentes con los valores previstos del modelo (Tabla 6); la formulación optimizada presentó buena estabilidad (umbral de aglomeración bajo) y mantuvo la calificación de sus atributos sensoriales por los panelistas en la categoría “Me gusta”. Sin embargo, se observó una discrepancia en el valor de L^* debido a la mayor concentración de PA utilizada.

Discusión

En general, los diferentes hallazgos en la concentración y tipo de ácidos grasos de la HSA pueden atribuirse a factores climáticos del cultivo, grado de madurez, diversidad genética, aspectos fenotípicos, condiciones de secado y de extracción del aceite (Amin *et al.*, 2019; Prommaban *et al.*, 2021). La HSA se puede destacar como una fuente potencial de ácidos grasos insaturados debido a la participación del 41.5 % y 23.5 % de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) y monoinsaturados (MUFA), respectivamente, los cuales deben ser suministrados a través de la dieta, ya que no pueden sintetizarse en el cuerpo humano; además, se ha demostrado que estos ayudan a mantener niveles saludables de colesterol de lipoproteínas de alta densidad (HDL) y reducen el colesterol de lipoproteínas de baja densidad (LDL) (Amin *et al.*, 2019). Por lo tanto, estos resultados indican que la incorporación de la HSA puede añadir valor a la BLF para ser considerada un alimento funcional, debido a que puede proporcionar

Tabla 3. Propiedades fisicoquímicas de la bebida láctea fermentada

Variables					Respuesta				
Tratamiento	PA (%)	AMM (%)	pH	Acidez (%)	SST (°Brix)	a*	b*	Sinéresis (%)	μ (mPa.s)
1	8.0	0.40	4.44±0.5	0.643±0.02	14.2±0.20	-1.41±0.1,9	28.0±0.74	33.5±0.04	147±8.41
2	6.0	0.70	4.43±0.03	0.660±0.05	14.8±0.15	-1.19±0.09	25.6±0.28	32.2±0.84	76.1±1.89
3	7.0	0.34	4.41±0.01	0.653±0.05	14.1±0.42	-1.56±0.17	22.0±0.95	37.0±0.29	131±4.04
4	8.4	0.55	4.43±0.02	0.633±0.15	13.7±0.42	-1.49±0.03	25.0±1.80	33.3±0.67	109±5.39
5	7.0	0.55	4.38±0.05	0.683±0.10	13.9±0.26	-1.21±0.04	25.5±0.56	29.1±0.63	134±3.23
6	5.6	0.55	4.46±0.02	0.633±0.15	14.5±0.23	-1.83±0.05	23.3±0.57	33.0±0.22	89.8±4.81
7	7.0	0.55	4.45±0.01	0.667±0.15	16.6±0.35	-1.13±0.19	26.4±0.51	33.2±0.58	51.0±4.40
8	8.0	0.70	4.50±0.01	0.630±0.15	14.7±0.21	-1.57±0.08	25.5±0.84	33.0±0.93	117±1.33
9	7.0	0.55	4.48±0.05	0.633±0.15	14.3±0.06	-2.02±0.03	19.3±0.76	34.0±0.82	57.2±5.22
10	7.0	0.55	4.41±0.05	0.673±0.11	14.4±0.10	-1.22±0.04	25.5±0.56	35.1±0.45	124±4.53
11	6.0	0.40	4.37±0.06	0.617±0.10	14.4±0.10	-2.06±0.08	25.6±0.84	33.5±0.74	158±2.90
12	7.0	0.55	4.42±0.05	0.647±0.05	13.9±0.06	-1.10±0.19	26.4±0.51	31.1±0.92	134±3.60
13	7.0	0.55	4.40±0.06	0.600±0.10	13.8±0.06	-2.37±0.22	21.7±0.82	30.7±0.29	160±1.92
14	7.0	0.55	4.34±0.06	0.597±0.05	13.8±0.06	-2.01±0.03	19.3±0.76	27.3±0.07	131±8.51
15	7.0	0.76	4.44±0.03	0.620±0.10	14.5±0.05	-2.11±0.11	19.2±0.92	28.5±0.43	157±5.80
16	7.0	0.55	4.23±0.05	0.683±0.05	14.9±0.15	-0.20±0.04	23.5±0.54	37.3±0.13	99.6±2.22

*La concentración de la HSA fue definida por evaluación sensorial en la primera fase del experimento, el cual fue del 1.5 % para todos los tratamientos. Los valores de viscosidad fueron evaluados a una tasa de corte de 50.6 s⁻¹.

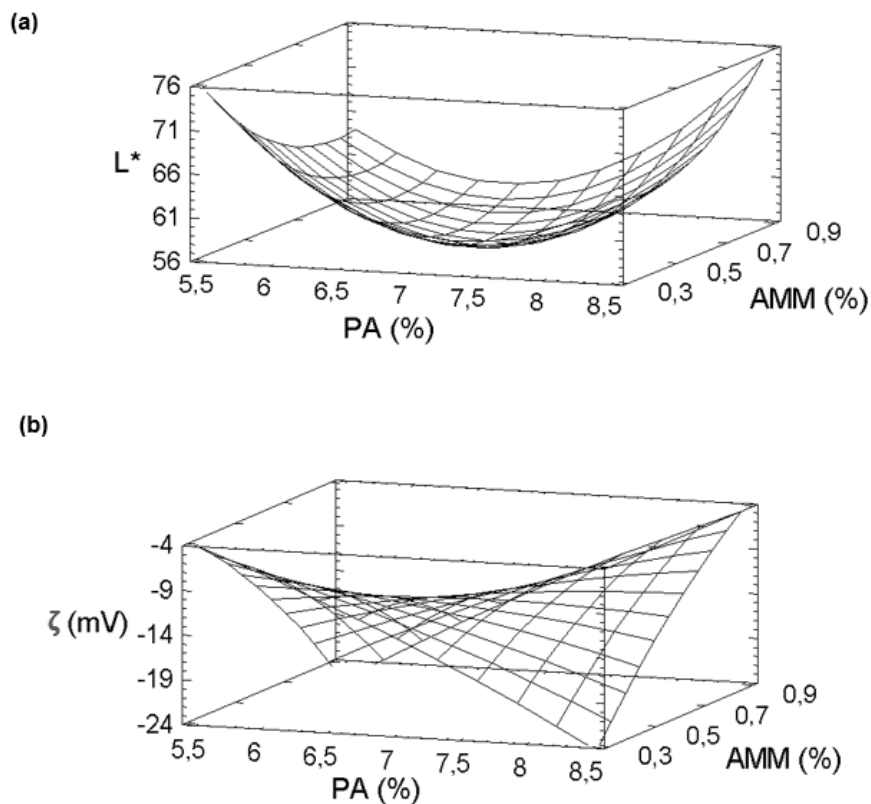


Figura 1. Gráficas de superficie de respuesta que muestran el efecto de las interacciones entre la concentración de pulpa de ayuaya y almidón modificado de maíz sobre la luminosidad (L^*) y potencial zeta (ζ) de la bebida láctea fermentada.

efectos fisiológicos beneficiosos en la prevención de trastornos cardiovasculares, neurológicos, visuales y cancerosos (Leichtweis *et al.*, 2023). Sin embargo, la elevada concentración de ácido linoleico en la HSA la hace propensa a la oxidación (Tabla 1), por lo que

Tabla 4. Análisis de varianza de propiedades fisicoquímicas y sensoriales de la BLF con adición de HSA, PA y AMM

Variable	R ² (%)	Relación F del modelo	Valor P>F
pH	21.45	2.732	0.0828
Acidez	13.10	1.508	0.2711
SST	7.42	0.802	0.5732
a*	17.17	2.074	0.1527
b*	41.90	7.214	0.0042
L*	51.89	10.788	0.0009
Potencial Z (ζ)	56.26	12.864	0.0004
Sinéresis	23.84	3.131	0.0587
μ	24.27	3.205	0.0552
Olor	48.66	0.202	0.9542
Color	64.10	17.857	0.0001
Sabor	37.50	6.000	0.0081
Consistencia	25.00	3.330	0.0498

al ser aplicada en leches fermentadas su posible deterioro se minimiza, lo cual hace muy viable su incorporación en matrices lácteas (Cuco *et al.*, 2019).

Desde la perspectiva sensorial, el tratamiento T1 obtuvo la mayor calificación entre las muestras evaluadas (Tabla 2). Lo anterior probablemente se debe a que la mayor concentración de HSA incorporada a la BLF para T2 y T3 aumentaba la sensación de granulosidad percibida en boca por los panelistas, similar a lo reportado por Öztürk *et al.* (2018) y Saeed *et al.* (2021), quienes fortificaron leche fermentada con harina de olivo y moringa, lo que ocasionó que la aceptabilidad general disminuyera por la percepción de granulosidad en la muestra. En ese sentido, se seleccionó el tratamiento T1, ya que con el 1.5 % de HSA adicionada se puede declarar a la BLF como una “buena fuente de fibra dietaria” según lo establecido en la Resolución 810 de 2021 del Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, debido a que proporciona el 10 % del valor diario de referencia de fibra dietaria para niños mayores de 4 años y adultos.

El pH de las BLF se mantuvo por debajo de 4.6, lo que corresponde al punto isoeléctrico de la caseína. Por ello, se considera que los valores obtenidos no afectan la estabilidad de las BLF, conforme con lo

Tabla 5. Clasificación de atributos sensoriales por consumidores de la BLF con adición de HSA, PA y AMM

Tratamiento	Olor	Color	Sabor	Consistencia
1	3 ± 0.87	3 ± 0.93	4 ± 1.01	4 ± 1.02
2	4 ± 0.84	3 ± 0.94	4 ± 0.84	3 ± 0.95
3	3 ± 1.01	4 ± 0.97	4 ± 0.92	4 ± 0.96
4	3 ± 0.75	4 ± 0.92	4 ± 0.99	4 ± 0.90
5	3 ± 0.91	3 ± 0.86	4 ± 0.99	3 ± 0.97
6	3 ± 0.87	3 ± 0.88	4 ± 0.92	3 ± 1.07
7	3 ± 0.87	3 ± 0.88	5 ± 0.85	5 ± 0.99
8	3 ± 0.88	4 ± 0.84	4 ± 0.96	3 ± 0.99
9	4 ± 0.92	3 ± 0.90	4 ± 1.10	4 ± 0.96
10	4 ± 0.80	3 ± 0.89	4 ± 0.95	4 ± 0.96
11	3 ± 0.86	3 ± 0.93	4 ± 0.98	4 ± 0.97
12	4 ± 0.77	3 ± 0.89	4 ± 1.01	3 ± 1.19
13	4 ± 0.96	3 ± 0.90	4 ± 1.11	4 ± 0.99
14	3 ± 0.93	3 ± 0.90	4 ± 0.90	4 ± 1.01
15	4 ± 0.86	3 ± 0.89	3 ± 0.98	4 ± 0.99
16	4 ± 0.85	3 ± 0.79	4 ± 0.92	4 ± 0.90

*La concentración de la HSA fue definida por evaluación sensorial en la primera fase del experimento siendo del 1.5 % para todos los tratamientos. Los valores descritos por cada tratamiento corresponden al promedio de la calificación otorgada por los panelistas para cada atributo.

Tabla 6. Criterios de optimización y validación de las propiedades fisicoquímicas y sensoriales de la bebida láctea fermentada

Restricciones	Objetivo	Límite inferior	Límite superior	Valor previsto	Valor experimental
Luminosidad (L*)	Maximizar	51.2	68.4	64.1	53.5
Potencial zeta (ζ)	Minimizar	-19.4	-9.9	-22.2	-21.4
Color-sensorial	Maximizar	3.00	4.00	4.00	4.00

reportado por Díaz-Trujillo *et al.* (2023). La acidez, como medida de control de calidad por su relación con la actividad microbiana, se mantuvo dentro de los estándares establecidos por la Norma Técnica Colombiana - NTC 805 (ICONTEC, 2005), que exige un mínimo del 0.6 %. Hallazgos similares han sido reportados por Pachekrepapol *et al.* (2021), quienes desarrollaron bebidas lácteas utilizando diferentes estabilizantes/espesantes y pulpas de frutas sin condicionar la desnaturalización de las proteínas. Por otro lado, la incorporación de la PA y HSA a la BLF contribuyó notablemente al incremento de los SST, mejorando la percepción sensorial de la BLF. Este comportamiento es consistente con el reportado por Díaz-Trujillo *et al.* (2023), quienes lograron valores entre 23 y 34° Brix al añadir pitahaya a la leche fermentada, lo que favoreció la consistencia del producto. Además, un mayor contenido de SST puede mejorar la estabilidad microbiana al reducir la actividad de agua, disminuyendo así el riesgo de desarrollo de microorganismos patógenos (Imbachí-Narváez *et al.*, 2019).

Con relación al color de las BLF, los valores negativos de a^* (-0.211 a -2.423) y positivos de b^* (19.2 a 28,0), que representan el grado de verdor y amarilleo en el espacio Cielab, evidenciaron tonos de color amarillo de baja intensidad, asociados a la pigmentación de los carotenoides aportados por la PA, moléculas precursoras de la provitamina A (Cardozo *et al.*, 2021). En cuanto a los valores de L^* (Figura 1), su maximización para mayores concentraciones de PA podría estar asociada a la variación del tamaño de partícula por formación de agregados, dado que, según la teoría de Fraunhofer, la intensidad de la luz dispersada por las partículas es directamente proporcional a su tamaño (Keshtkaran *et al.*, 2013).

En términos de la estabilidad parcial (sinéresis reducida) de las BLF, es probable que esta se deba al aumento en la carga positiva de la caseína a un pH inferior al punto isoeléctrico. Este fenómeno es asociado con un aumento en la rigidez y estabilidad de la red de proteína, mejorando su capacidad para retener el suero (Pachekrepapol *et al.*, 2021). Además, los valores de ζ sugieren una tendencia a la floculación debido a las fuerzas menos repulsivas entre las partículas. Este comportamiento podría estar inducido por la pectina presente en la PA, que contribuye a disminuir las cargas negativas dentro del sistema (Baississe y Fahloul, 2018; Sun *et al.*, 2020). Por otro lado, Tsevdou *et al.* 2020 argumentaron que el aumento gradual de la concentración de almidón en lácteos fermentados redujo de forma irregular el ζ . Este efecto podría atribuirse a la coacción de la repulsión electrostática y al impedimento estérico generado entre el polisacárido y las proteínas de la leche.

Las BLF desarrolladas mostraron una aceptabilidad general positiva, con puntuaciones predominantes en la categoría de “Me gusta”. Este resultado

coincide con los hallazgos de Senadeera *et al.* (2018) y Bianchini *et al.* (2020), quienes mencionaron que las calificaciones de atributos como olor, sabor y color en leches fermentadas con adición de frutas están influenciadas por las concentraciones y tipos de pigmentos presentes en estas materias primas, así como por los hábitos alimenticios de los consumidores. En cuanto a la consistencia, investigaciones previas han señalado que una textura más espesa y una sinéresis reducida suelen ser mejor valoradas por los consumidores, en contraste con muestras más semilíquidas. Por ello, se sugiere aumentar la concentración de almidón (≥ 1.5 %), ya que esto puede potenciar esta característica de calidad (Wong *et al.*, 2020). Estos aspectos resultan cruciales en productos como las BLF, si se tiene en cuenta que la percepción de consistencia no solo influye en la experiencia sensorial, sino también en la sensación de calidad y saciedad que ofrece el producto.

Conclusión

Se desarrolló una BLF tipo yogur, a la cual se le dio valor agregado a partir de la utilización del lactosuero dulce, coproducto de la industria quesera, y también con la adición de HSA, PA y AMM. La HSA contribuyó al perfil funcional del producto al aportar fibra y ácidos grasos esenciales. La PA, en términos de color, proporcionó tonos amarillo-naranja, característicos de la pigmentación propia de los carotenoides. El AMM favoreció los valores de sinéresis y potencial zeta, posicionando la bebida láctea fermentada como un alimento estable fisicoquímicamente. Finalmente, la BLF presentó características de calidad que concuerdan con los requisitos fisicoquímicos establecidos por la legislación nacional, además presentó una aceptabilidad sensorial del 79 % de los panelistas, que le otorgaron la calificación en la categoría de “Me gusta”.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia y a la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, el apoyo financiero recibido para la realización de la presente investigación a través de la convocatoria 776 “Patrimonio autónomo del Fondo Nacional de Financiamiento para la Ciencia y la Innovación - Francisco José de Caldas”.

Referencias

- Amin, M.; Islam, T.; Uddin, M.; Rahman, M. y Satter, M. (2019). Comparative study on nutrient contents in the different parts of indigenous and hybrid varieties of pumpkin (*Cucurbita maxima* Linn.). *Heliyon*, 5(9), e02462. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02462>.

- Baïssisse, S. y Fahloul, D. (2018). Rheological behavior and electrokinetic properties of pectin extracted from pumpkin (*Cucurbita maxima*) pulp and peel using hydrochloric acid solution. *Chemical Papers*, 72, 2647-2658. <https://doi.org/10.1007/s11696-018-0500-0>.
- Bianchini, C.; Vieira, M.; Dias, C.; Seraglio, K.; Costa, A.; Komatsu, R. et al. (2020). Incorporation of uvaia (*Eugenia pyrifolia* Cambess) pulp in yogurt: A promising application in lactose-free dairy product market. *Journal of Food Processing And Preservation*, 44(10), e14829. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14829>.
- Calvario-Palma, A.; Cruz-Hernandez, J. y Barroso-Bravo, L. (2019). Nutritional and sensory characterization of a muicle based beverage that combines amaranto and berries. *Espamciencia*, 10(2), 52-57.
- Cardozo, C.; Hernández, D.; Caballero, B.; Velásquez, H.; Molina, D. y Londoño, G. (2021). Physical, physiological, physicochemical and nutritional characterization of pumpkin (*Cucurbita maxima*) in postharvest stage cultivated in Antioquia-Colombia. *Revista Facultad Nacional De Agronomía Medellín*, 74, 9735-9744. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n3.90820>.
- Cuco, R.; Cardozo-Filho, L. y da Silva, C. (2019). Simultaneous extraction of seed oil and active compounds from peel of pumpkin (*Cucurbita maxima*) using pressurized carbon dioxide as solvent. *The Journal of Supercritical Fluids*, 143, 8-15. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2018.08.002>.
- Díaz-Trujillo, M.; Villa-Fonseca, D.; Álvarez-Solano, O.; Lanea, V. y Hernández-Carrión, M. (2023). Formulación de un producto lácteo a partir de pitahaya amarilla y sus subproductos. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 8, 697-707. <https://doi.org/10.29105/idcyta.v8i1.91>.
- Gutiérrez-Álzate, K.; Rosario, I.; de Jesus, R.; Maciel, L.; Santos, S.; O. de Souza, C.; Vieira, C.; Cavalheiro, C. y da Costa, M. (2023). Physicochemical, rheological, and nutritional quality of artisanal fermented mil beverages with cupuassu (*Theobroma grandiflorum*) pulp and flour. *Foods*, 12, 2217. <https://doi.org/10.3390/foods12112217>.
- Imbachí-Narváez, P.; Sepúlveda-Valencia, J. y Rodríguez-Sandoval, E. (2019). Effect of modified cassava starch on the rheological and quality properties of a dairy beverage prepared with sweet whey. *Food Sci. Technol.*, 39(1), 134-142. <https://doi.org/10.1590/1678-457X.28017>.
- Jaster, H.; Arend, G.; Rezzadori, K.; Chaves, V.; Reginatto, F. y Petrus, J. (2018). Enhancement of antioxidant activity and physicochemical properties of yogurt enriched with concentrated strawberry pulp obtained by block freeze concentration. *Food Research International*, 104, 119-125. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.10.006>.
- León-López, A.; Pérez-Marroquín, X.; Campos-Lozada, G.; Campos-Montiel, R. y Aguirre-Álvarez, G. (2020). Characterization of whey-based fermented beverages supplemented with hydrolyzed collagen: Antioxidant activity and bioavailability. *Foods*, 9(8), 1106. <https://doi.org/10.3390/foods9081106>.
- Leichtweis, M.; Molina, A.; Dias, M.; Calhelha, R.; Pires, T.; Pavli, O.; Oliveira, M.; Petropoulos, S.; Barros, L. y Pereira, C. (2023). Variability in chemical profile and bioactivities of the flesh of greek pumpkin landraces. *Horticulturae*, 9(11), 1232. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9111232>.
- Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2021). Resolución 810 de 2021. Reglamento técnico sobre los requisitos de etiquetado nutricional y frontal que deben cumplir los alimentos envasados o empacados para consumo humano. https://www.minsalud.gov.co/Normatividad_Nuevo/Resoluci%C3%B3n%20No.%20810de%202021.pdf
- Öztürk, H.; Aydin, S.; Sözeri, D.; Demirci, T.; Sert, D. y Akin, N. (2018). Fortification of set-type yoghurts with *Elaeagnus angustifolia* L. flours: Effects on physicochemical, textural, and microstructural characteristics. *LWT*, 90, 620-626. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.012>.
- Pachekrepapol, U.; Kokhuenkhan, Y. y Ongsawat, J. (2021). Formulation of yogurt-like product from coconut milk and evaluation of physicochemical, rheological, and sensory properties. *International Journal of Gastronomy And Food Science*, 25, 100393. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100393>.
- Prommaban, A.; Kuanchoom, R.; Seepuan, N. y Chaiyana, W. (2021). Evaluation of fatty acid compositions, antioxidant, and pharmacological activities of pumpkin (*Cucurbita moschata*) seed oil from aqueous enzymatic extraction. *Plants (Basel)*, 10(8), 1582. <https://doi.org/10.3390/plants10081582>.
- Saeed, M.; Ali, S. y Ramzan, S. (2021). Physicochemical analysis of mango flavored yogurt supplemented with Moringa oleifera leaf powder. *Journal of Food and Science Technology*, 58(12), 4805-4814. <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05146-w>.
- Senadeera, S.; Prasanna, P.; Jayawardana, N.; Gunasekara, D.; Senadeera, P. y Chandrasekara, A. (2018). Antioxidant, physicochemical, microbiological, and sensory properties of probiotic yoghurt incorporated with various *Annona* species pulp. *Heliyon*, 4(11), e00955. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00955>.
- Sun, W.; Yang, W.; Zheng, Y.; Zhang, H.; Fang, H.; Liu, D. et al. (2020). Effect of potato pulp pectic polysaccharide on the stability of acidified milk drinks. *Molecules*, 25(23), 5632. <https://doi.org/10.3390/molecules25235632>.
- Tsevdou, M.; Ouli-Rousmi, M.; Soukoulis, C. y Taoukis, P. (2020). Impact of high-pressure process on probiotics: Viability kinetics and evaluation of the quality characteristics of probiotic yoghurt. *Foods*, 9(3), 360. <https://doi.org/10.3390/foods9030360>.
- Wong, S.; Wicklund, R.; Bridges, J.; Whaley, J. y Koh, Y. (2020). Starch swelling behavior and texture development in stirres yogurt. *Food Hydrocoll*, 98, 105274. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105274>.

Respuesta germinativa y desarrollo fisiológico *in vitro* de *Guazuma crinita* Mart. a partir de semillas sexuales

In vitro germination response and physiological development of *Guazuma crinita* Mart. from sexual seeds

Antony Cristhian Gonzales-Alvarado ^{1,2,5}, Rayme Roxana Tuanama Pinchi ^{1,6}, Carlos César Arévalo-Salles ^{1,7}, Jorge Arturo Mori-Vásquez ^{1,8}, Jesús Selim-Bardales ^{1,9}, Jorge Manuel Revilla-Chávez ^{3,10}, Jorge Washinton Vela Alvarado ^{1,11}, Marx Herrera-Machaca ^{1,12}, Nathalia de Setta ^{2,13}.

¹Universidad Nacional de Ucayali. Ucayali, Perú. ²Universidade Federal do ABC. São Bernardo do Campo, SP, Brasil. ³Instituto de Investigación de la Amazonía Peruana – IIAP. Ucayali, Perú. ⁴Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Puerto Maldonado, Perú. ⁵  antony.gonzales@ufabc.edu.br; ⁶  tuanama.roxana.fores.95@gmail.com; ⁷  carevalosalles@gmail.com; ⁸  jorge_mori@unu.edu.pe; ⁹  jesus.bardales2003@gmail.com; ¹⁰  jrevilla@iiap.gob.pe; ¹¹  jorge_vela@unu.edu.pe; ¹²  mherrera@unamad.edu.pe; ¹³  nathalia.setta@ufabc.edu.br



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.115223>

2024 | 73-1 p 16-24 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-06-23 Acep.: 2024-11-21

Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar la respuesta y el desarrollo fisiológico *in vitro* de *Guazuma crinita* Mart. El experimento, conducido con diseño completamente al azar, evaluó 5 tratamientos con diferentes medios de cultivo y concentraciones: MS (T2), ½ MS (T3), WPM (T4), ½ WPM (T5) y como testigo (T1) se excluyeron los medios de cultivo y solo se utilizó agar. Cada tratamiento estuvo compuesto por 35 repeticiones, dentro de las cuales la unidad experimental fue un frasco con 4 semillas. Las variables analizadas fueron: porcentaje de germinación (%G), altura aérea (HP), número de nudos (NN), número de hojas (NH), masa fresca (MF) y seca (MS). Los principales resultados demostraron que la utilización de agar (T1) presentó el mayor porcentaje de germinación (63.28 %). En cuanto al desarrollo fisiológico, el medio WPM al 100 % (T4) obtuvo los valores más altos en altura aérea (17.59 cm/planta), número de nudos (5.25 nudos/planta), número de hojas (6.18 hojas/planta), masa fresca (192.8 mg/planta) y seca (24.1 mg/planta). Así mismo, se evidenciaron correlaciones positivas entre las variables estudiadas y, por otra parte, el PCA reveló diferentes agrupamientos entre todos los tratamientos. Estos resultados subrayan la relevancia de seleccionar medios de cultivo adecuados para optimizar tanto la germinación como el desarrollo fisiológico de *G. crinita*.

Palabras clave: altura de planta, germinación *in vitro*, medio de cultivo *in vitro*, Murashige y Skoog (MS), Woody Plant Medium (WPM).

Abstract

The objective of this study was to determine the *in vitro* physiological response and development of *Guazuma crinita*. The experiment, conducted with a completely randomized design, evaluated five treatments with different culture media and concentrations: MS (T2), ½ MS (T3), WPM (T4), ½ WPM (T5), and T1 as a control, where the culture media was excluded and only agar was used. Each treatment consisted of 35 replicates, the experimental unit being a jar with four seeds. The variables analyzed were germination percentage (%G), aerial height (HP), number of nodes (NN), number of leaves (NH), fresh mass (MF), and dry mass (DM). The main results showed that the use of agar (T1) presented the highest germination percentage (63.28 %). Regarding physiological development, 100 % of the WPM medium (T4) presented the highest values in aerial height (17.59 cm/plant), number of nodes (5.25 nodes/plant), number of leaves (6.18 leaves/plant), fresh mass (192.8 mg/plant), and dry mass (24.1 mg/plant), as well as positive correlations between the variables studied. On the other hand, the PCA revealed different groupings for all treatments. These results highlight the importance of selecting appropriate culture media to optimize both germination and physiological development of *G. crinita*.

Keywords: *in vitro* culture medium, *in vitro* germination, plant height, Murashige and Skoog (MS), Woody Plant Medium (WPM).

Introducción

Guazuma crinita Mart., conocida como bolaina blanca, es una especie forestal nativa de Ucayali, Perú, que en las últimas décadas ha ganado relevancia debido a su alta demanda por parte de los productores forestales. Esto se debe a su rápido crecimiento y su notable capacidad de rebrote (Revilla-Chávez *et al.*, 2021). Además, posee un notable potencial para proyectos de reforestación y restauración ecológica (Arévalo-Hernández *et al.*, 2024). La madera de bolina blanca tiene múltiples aplicaciones en diversas industrias, incluyendo la fabricación de diversos utensilios, muebles y parihuelas. También se emplea como materia para la obtención de celulosa para la producción de papel (Tuisima-Coral *et al.*, 2020; Casas *et al.*, 2022).

Generalmente *G. crinita* se reproduce a través de semillas biológicas, lo que resulta en una alta variabilidad genética producida por la libre reproducción sexual, y dificulta, de esta manera, la transmisión de características especiales de individuos a su descendencia. A esto hay que agregar que este medio de reproducción limita los estudios sobre fisiología y manipulaciones genéticas.

Para aprovechar las características especiales que podrían tener algunos especímenes de esta especie, como, por ejemplo, mayor velocidad de crecimiento en altura e incremento en volumen, la propagación asexual emplea diversos métodos que facilitan la multiplicación de muchas plantas. Dentro de estos métodos se destaca el cultivo *in vitro* de tejidos vegetales, que consiste en la multiplicación de células, tejidos u órganos de plantas en condiciones controladas (Chen *et al.*, 2016) y a través del cual se puede mejorar el potencial productivo y acelerar el desarrollo fisiológico (Jayusman y Dalimunthe, 2022), así como sentar las bases para futuros programas de mejoramiento genético en plantas leñosas.

El cultivo *in vitro* es un método útil para favorecer la germinación de semillas libres de patógenos. También se constituye como un método rápido y confiable para la propagación debido a las altas tasas de multiplicación que se puede lograr con pequeños fragmentos vegetales, lo cual garantiza el establecimiento de plantas *ex vitro* durante todo el año (Micheli *et al.*, 2020; Sakr, 2022).

Sin embargo, el éxito de la germinación *in vitro* está vinculado a muchos factores; uno de ellos es el tipo de medio de cultivo, ya que su composición desempeña un papel crucial en el desarrollo de las plantas al suministrar sustancias esenciales para el crecimiento de los explantes. El medio de cultivo utilizado con mayor frecuencia es Murashige y Skoog (MS), aunque el Woody Plant Medium (WPM) también ha demostrado ser efectivo para explantes leñosos (Tombion *et al.*, 2023).

Actualmente existen pocos estudios sobre el manejo *in vitro* de *Guazuma crinita*. Estos estudios representan avances parciales en diferentes fases, como la asepsia de semillas biológicas, la exploración de diversas fitohormonas para el desarrollo morfogénico (Gonzales-Alvarado *et al.*, 2022), la micropropagación *in vitro* (Maruyama *et al.*, 1997), la criopreservación (Maruyama, 2002) y el encapsulamiento de brotes *in vitro* (Maruyama *et al.*, 1997). Sin embargo, estos estudios no han abordado de manera integral la optimización del desarrollo fisiológico utilizando los diferentes medios de cultivo disponibles en el mercado. Nuestra investigación plantea que el uso de los medios de cultivo adecuados podría mejorar significativamente tanto la respuesta germinativa como el desarrollo fisiológico *in vitro* de *Guazuma crinita*, estableciendo base sólida para su mejoramiento genético. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la respuesta germinativa y desarrollo fisiológico *in vitro* de *Guazuma crinita* a partir de semillas sexuales, con el fin de establecer un método que permita optimizar el tiempo de germinación y el desarrollo fisiológico para contribuir al mejoramiento genético de la especie.

Material y métodos

Lugar de ejecución

La investigación se ejecutó en el Laboratorio de Cultivo de Tejidos Meristemas de la Universidad Nacional Ucayali, ubicado dentro en el kilómetro 6.200 de la Carretera Federico Basadre, Ucayali, Perú.

Origen y desinfección de semillas

Fueron utilizadas semillas biológicas sanas de plantaciones de *G. crinita* establecidas por el Centro Internacional de Investigación Agroforestal (ICRAF) dentro de su programa de domesticación participativa de árboles desarrollado en la región Ucayali en la década del 90 y del 2000.

Para la desinfección de las semillas biológicas fue replicado el protocolo desarrollado por Gonzales-Alvarado *et al.* (2022), el cual se detalla a continuación: 30 minutos de desinfección superficial con 30 g L⁻¹ de Benlate®, 2 % de hipoclorito de sodio (NaClO) durante 10 minutos, 1 minuto en alcohol comercial de 70 % y 5 enjuagadas con agua destilada esterilizada.

Medios de cultivo, tratamientos y variables

Como medios de cultivo se utilizaron las formulaciones de Murashige y Skoog (1962), y Lloyd y McCown (1980) (Murashige y Skoog [MS] y Woody Plant Medium [WPM], respectivamente) a diferentes concentraciones. Se aplicaron 5 tratamientos (tabla 1) que son los siguientes: 100 % MS (T2), 50 % MS

(T3), 100 % WPM (T4), 50 % WPM (T5) y el testigo (T1) sin ningún medio de cultivo. En todos los medios de cultivo se agregó 7 g L⁻¹ de agar (PhytoTech) y 30 g L⁻¹ de sacarosa. Así mismo, para cada tratamiento, se ajustó el pH a 5.8.

Para cada unidad experimental 25 mL de medio de cultivo fueron vertidos en frascos de 80 mm x 63 mm. Todos los fueron autoclavados a 121 °C; 1.1 atm durante 20 minutos. Luego fueron retirados y enfriados. En cada frasco se inocularon 4 semillas y luego fueron situados en un ambiente de 23 °C ± 2 °C con 75 % de humedad y fotoperiodo de 16 horas. Cada tratamiento estuvo compuesto por 35 repeticiones; la unidad experimental fue un frasco con 4 semillas.

Las variables analizadas fueron porcentaje de germinación (%G), altura aérea de la plántula (HP) (cm/planta), número de nudos (NN), número de hojas (NH), y masa fresca y masa seca (MF/MS) (mg/planta). Para el cálculo de %G, las semillas se consideraron germinadas únicamente cuando la radícula sobresalía 0.1 cm. Las variables HP, NN y NH se evaluaron 120 días después de la inoculación, mientras que el %G fue evaluado 2 veces por semana, durante 30 días.

Para la determinación de masa fresca (mg/planta), 10 plántulas fueron retiradas de los frascos y limpiadas, después fueron pesadas en una balanza analítica digital con precisión de 0.1 mg. Para la masa seca (mg/planta), estas mismas plántulas fueron secadas en una estufa a 70 °C por 72 h, y fueron pesadas nuevamente en una balanza analítica de precisión (Gonzales-Alvarado y Cardoso, 2024).

Tabla 1. Tratamientos aplicados y número de repeticiones por tratamientos. MS: 100 %; ½ MS: 50 %; WPM: 100 %; ½ WPM: 50 %

Tratamientos	Composición del medio de cultivo	Número de repeticiones
T1	Agar	35
T2	Agar + MS	35
T3	Agar + ½ MS	35
T4	Agar + WPM	35
T5	Agar + ½ WPM	35
Unidades experimentales		175

Tabla 2. Efecto del medio de cultivo en la germinación in vitro de semillas de *G. crinita* Mart.

T	Porcentaje de germinación durante 30 días								
	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
T1	0 ^A	46.09 ^A	55.47 ^A	59.38 ^A	60.94 ^A	61.72 ^A	61.72 ^A	63.28 ^A	63.28 ^A
T2	0 ^A	31.73 ^E	44.23 ^D	45.19 ^D	48.08 ^D	49.04 ^C	49.04 ^C	50 ^D	50.96 ^D
T3	0 ^A	32.29 ^D	36.46 ^E	42.71 ^E	42.71 ^E	45.83 ^D	45.83 ^D	45.83 ^E	46.88 ^E
T4	0 ^A	38.28 ^B	51.56 ^B	57.81 ^B	59.38 ^B	61.72 ^A	61.72 ^A	61.72 ^B	61.72 ^B
T5	0 ^A	37.93 ^C	48.28 ^C	51.72 ^C	55.17 ^C	56.90 ^B	58.62 ^B	58.62 ^C	58.62 ^C

*Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos según la prueba Tukey ($p < 0.05$). T: Tratamientos. E: números de evaluaciones.

Diseño experimental y análisis de datos

El experimento fue conducido con un diseño completamente al azar (DCA). Los resultados fueron sometidos a análisis de varianza (ANVA) y cuando los resultados dieron diferencias significativas, fueron sometidos a pruebas de comparación de medias con Tukey al 5 % de significancia ($\alpha = 0.05$). Los datos recopilados de las evaluaciones de las variables y el análisis estadístico fueron procesados en Open Office. Por su parte, el análisis estadístico se realizó en el programa computacional Sistema para Análisis de Variancia (SISVAR 5.6) (Ferreira, 2019). Para determinar las correlaciones, se realizó el análisis de correlación utilizando el coeficiente de correlación de Spearman, con un nivel de significancia del 5 % a partir de las medias, mientras para el PCA se utilizaron todos los datos; para ambos se utilizó el software R Studio.

Resultados

Efecto de los medios de cultivo en el porcentaje de germinación

Durante 30 días de evaluación, el porcentaje de germinación (%G) de semillas de *G. crinita* fue mayor en el tratamiento T1, con 46.09 %, 55.47 %, 59.38 %, 60.94 %, 61.72 %, 61.72 %, 63.28 %, 63.28 % para las 8 evaluaciones. Por otro lado, el tratamiento T4 mostró un comportamiento similar al T1 en la quinta evaluación (15 días), en la que ambos fueron estadísticamente semejantes (60.94^a; 61.72^a), aunque difirieron con el transcurso del tiempo en las evaluaciones posteriores, como se detalla en la tabla 2.

Todos los tratamientos presentaron una tasa de germinación superior a 50 % (> 50), y el T1 se destacó con un 63.28 % sin la presencia de un medio de cultivo y el T4 (61.72 %) que tenía WPM al 100 %. Además, se observó estabilidad numérica de la germinación en la penúltima y en la última evaluación (figura 1).

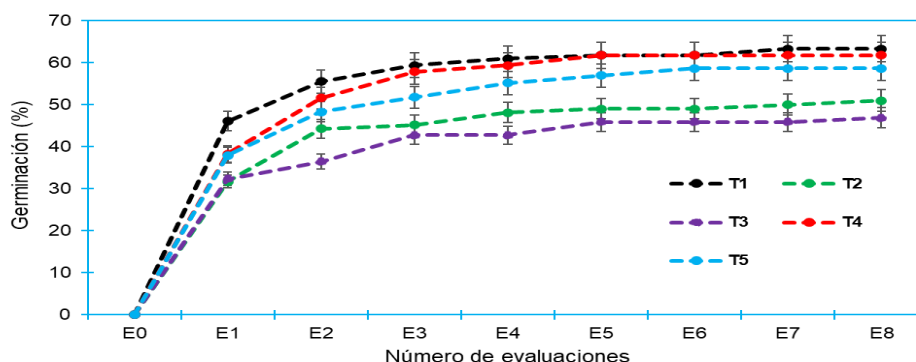


Figura 1. Porcentaje de germinación (%G) en periodo de 30 días. E: evaluación. EF: evaluación final (E8).

Desarrollo fisiológico

El efecto del medio de cultivo en la altura parte aérea (HP) mostró diferentes respuestas para cada tratamiento. El tratamiento T4 (WPM 100 %) obtuvo el mayor crecimiento (17.59 cm/planta), mientras que el tratamiento T1 mostró el menor crecimiento (5.07 cm/planta) (figura 2A). En cuanto al número de nodos (NN) (figura 2B), los tratamientos T4 y T5 presentaron los valores más altos (5.25 y 4.20 nudos/plantas, respectivamente), mientras T1 obtuvo los valores más bajos (1.93 nudos/plantas). En relación con el número de hojas (NH) (figura 2C), T4 obtuvo mayor número de hojas (6.18 hojas/plantas), mientras T1 obtuvo los valores más bajos (1.26 hojas/plantas). Por otro lado, los tratamientos T2, T3 y T5 mostraron valores intermedios para todas las variables estudiadas sin diferencias estadísticas entre ellas, excepto para la variable NN, cuyos valores intermedios fueron obtenidos en T2 y T3.

Los resultados de producción de masa fresca y seca (MF y MS) indicaron diferencias entre los tratamientos. El tratamiento T4 mostró mayor valor numérico en MF y MS (192.8 y 24.1 mg/planta, respectivamente), lo cual no difirió estadísticamente con los otros tratamientos. Por otro lado, el tratamiento T1 registró los valores numéricos más bajos de MF y MS para ambas variables (55.6 y 6.9 mg/planta, respectivamente). Mientras tanto, el tratamiento T5 obtuvo valores intermedios (114.8 y 14.4 mg/planta, respectivamente), como se muestra en la figura 3a y b.

Producción de masa fresca y seca, correlación y PCA de las variables

Los resultados de producción de masa fresca y seca (MF y MS) indicaron diferencias entre los tratamientos (figura 3a y b). El tratamiento T4 mostró los mayores valores numéricos en MF y MS, con 192.8 mg/planta y 24.1 mg/planta, respectivamente. Por otro lado, el tratamiento T1 registró los valores numéricos más bajos de MF y MS para ambas variables (55.6 y

6.9 mg/planta, respectivamente). Mientras tanto, el tratamiento T5 obtuvo valores intermedios (114.8 y 14.4 mg/planta, respectivamente), como se muestra en la figura 3a y b.

El análisis de correlación identificó 10 correlaciones, todas positivas. 9 correlaciones mostraron valores iguales o superiores a 0.90. Específicamente, las variables HP y MF; HP y MS; MF y MS presentaron valor absoluto de correlación de 1 ***, lo que indica una correlación perfecta entre ellas (figura 4). Por su parte, el análisis del PCA reveló distintos agrupamientos para cada uno de los tratamientos, con 94.4 % de la variación explicada por la primera dimensión (figura 5).

Discusión

En este estudio, los resultados obtenidos del efecto de los medios de cultivo en la germinación demostraron que el tratamiento T1, compuesto de agar, logró mayor porcentaje de germinación (63.28 %). Estos resultados son similares a los reportados por Gonzales-Alvarado *et al.* (2022), quienes obtuvieron un 72.55 % de germinación utilizando el agente gelificante Fitogel; la utilización de agentes gelificantes facilita la disponibilidad de agua libre (Al-Mayahi y Ali, 2021). Por otra parte, se observó que los tratamientos compuestos por diferentes medios de cultivo en diferentes concentraciones presentaron menores porcentajes de germinación debido a la presencia de sales, lo que genera disminución del potencial hídrico y osmótico del sustrato, y ocasiona que la semilla pierda agua o, en todo caso, demore más tiempo en absorber agua para su germinación (Rodríguez *et al.*, 2014).

En comparación con los tratamientos con MS, los tratamientos con WPM al 100 % y al 50 % obtuvieron los porcentajes más altos de germinación (61.72 % y 58.62 %, respectivamente). La composición del WPM se caracteriza por tener una baja concentración de sales de NH_4^+ y NO_3^- , lo cual lo hace ideal para el cultivo de plantas leñosas (Cassells y Curry, 2001). Por otro lado, el MS está compuesto por altas

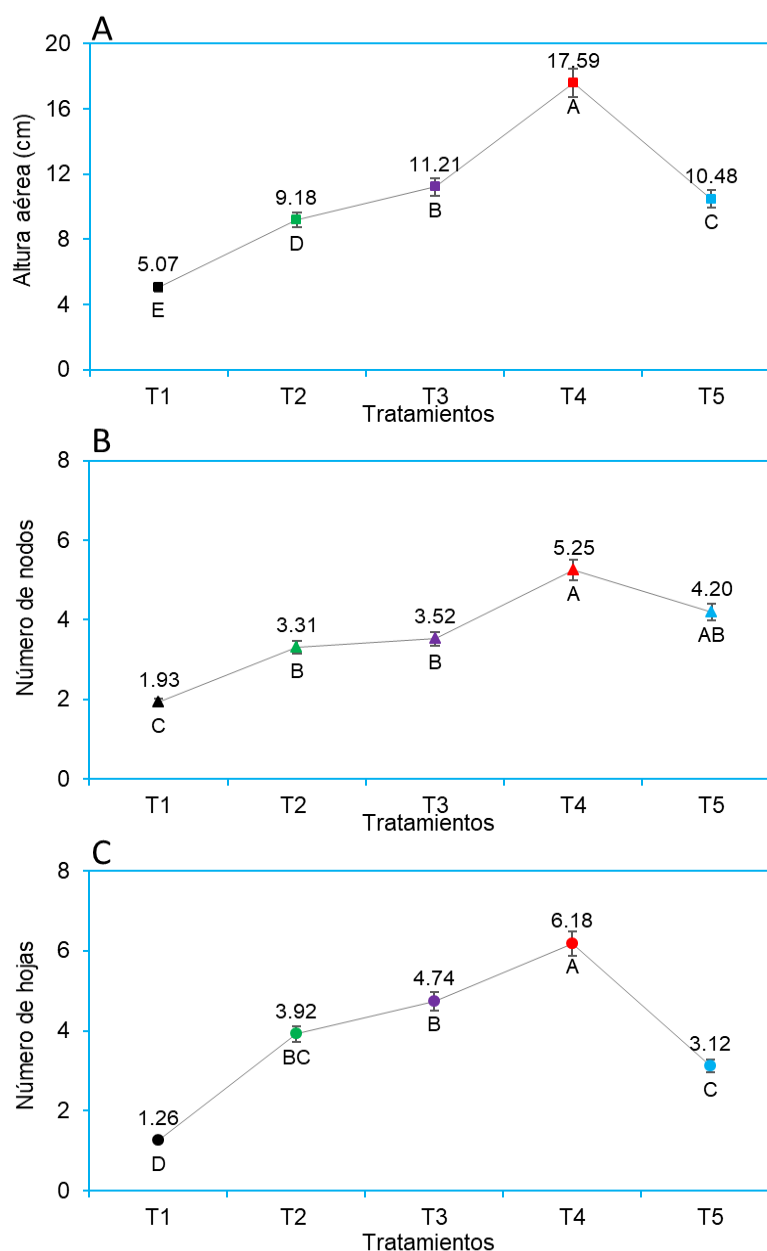


Figura 2. Efecto de los medios de cultivo en el desarrollo vegetal de *G. crinita* cultivadas *in vitro*. A: altura aérea (cm/planta). B: número de nodos. C: número de hojas. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba Tukey ($p < 0.05$). T1: agar; T2: MS; T3: 50 % MS; T4: WPM; T5: 50 % WPM.

concentraciones de iones de amonio, nitrato, cloro y MoO_4^- , y bajas concentraciones de PO_4^{3-} , Mg^{2+} , Cu^{2+} y Ca; este último es un componente tóxico para especies leñosas (Parada y Villegas, 2009) porque inhibe los procesos metabólicos y enzimáticos, como en el caso de *G. crinita* (Taiz et al., 2017).

Desarrollo fisiológico

El desarrollo fisiológico está influenciado por la composición de los medios de cultivo (Lantos et al., 2023). En *G. crinita*, se determinó que la utilización de Woody Plant Medium (WPM) resultó en una mayor altura de planta (HP) (17.59 cm), número de nudos

(NN) (5.25 nudos/planta) y número de hojas (NH) (6.18 hojas/plantas). Resultados similares fueron reportados por Rafael (2023) en *Bertholletia excelsa*, quien obtuvo una altura de 22.5 cm, 2.68 nudos/planta y 2.1 hojas/plantas con la utilización de WPM. Se considera que WPM es esencial para el cultivo de plantas leñosas (Cassells y Curry, 2021; Nowakowska et al., 2019), ya que se ha observado un potencial regenerativo en diferentes especies (Tar et al., 2018) contrarrestando la sensibilidad a las sales de algunas especies leñosas (Lloyd y McCow, 1980; Hechavarría-Pérez et al., 2023); por esta razón se observó un mayor desarrollo de *G. crinita* con el uso de WPM al 100 %.

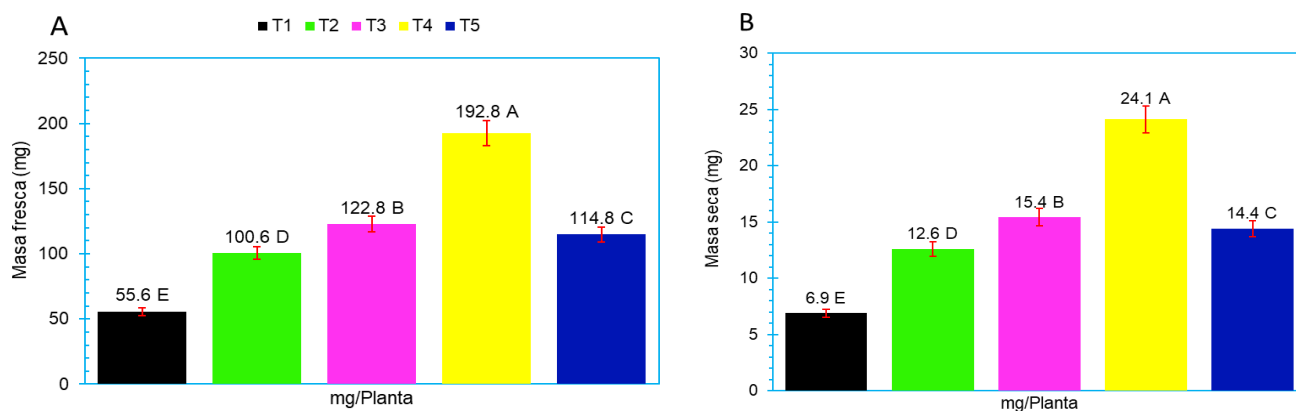


Figura 3. Producción de masa fresca y seca (mg/planta). A: masa fresca (mg/planta). B: masa seca (mg/planta). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tratamientos según la prueba Tukey ($p < 0.05$). T1: agar; T2: MS; T3: 50 % MS; T4: WPM; T5: 50 % WPM.

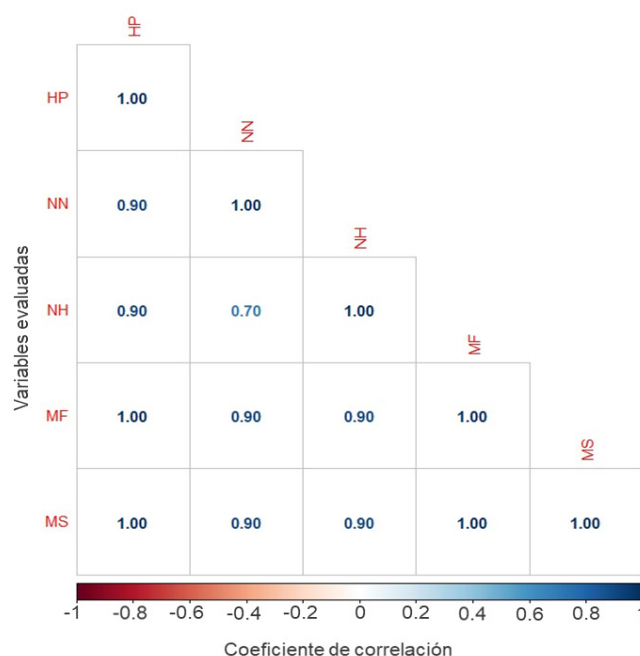


Figura 4. Correlación de las variables evaluadas del desarrollo de *G. crinita*. HP: altura de la parte aérea. NN: número de nudos. NH: número de hojas. MF: masa fresca. MS: masa seca.

El mejor crecimiento en altura aérea de la planta, número de nudos y hojas obtenidos en el cultivo *in vitro* de semillas de *G. crinita* en el medio WPM puede relacionarse con el menor contenido de sales, incluido el nitrógeno, en comparación con el medio de cultivo MS (Nowakowska *et al.*, 2019). Según Parada y Villegas (2009), el medio WPM presenta un 25 % de las cantidades de iones nitrato y amonio comparado con el medio MS. Es importante recordar que el WPM fue originalmente formulado para el cultivo de plantas leñosas (Harry y Thorpe, 1994).

Sin embargo, también se debe considerar que para algunas especies leñosas se obtienen mejores resultados con el medio MS. Según Daffalla *et al.* (2022), Sir El-Khatim *et al.* (2022) y Stephen *et al.* (2023) se obtuvieron mayores valores en la parte

aérea (13.51 cm; 9.29 cm; 7.12 cm) con la utilización de MS en *Acacia sieberiana*, *Acacia nubica* y *Cannabis sativa*, respectivamente.

Por otra parte, el hecho de que se obtuvieron mejores resultados con el medio WPM al 100 % que con el medio WPM al 50 %, podría indicar que la concentración de sales y otros compuestos nutritivos presentes en esa concentración son los más adecuados para el desarrollo de las plantas a partir de semillas de *G. crinita*. El tratamiento basado en agar (T1) demostró menor desarrollo, con una altura aérea de 5.07 cm/planta. 1.93 nudos/planta y 1.26 hojas/planta. Esta pequeña dimensión conlleva la disminución de las reservas nutricionales con el tiempo, lo que genera estrés en las plantas y, eventualmente, puede llevar su muerte (Gonzales-Alvarado *et al.*, 2022).

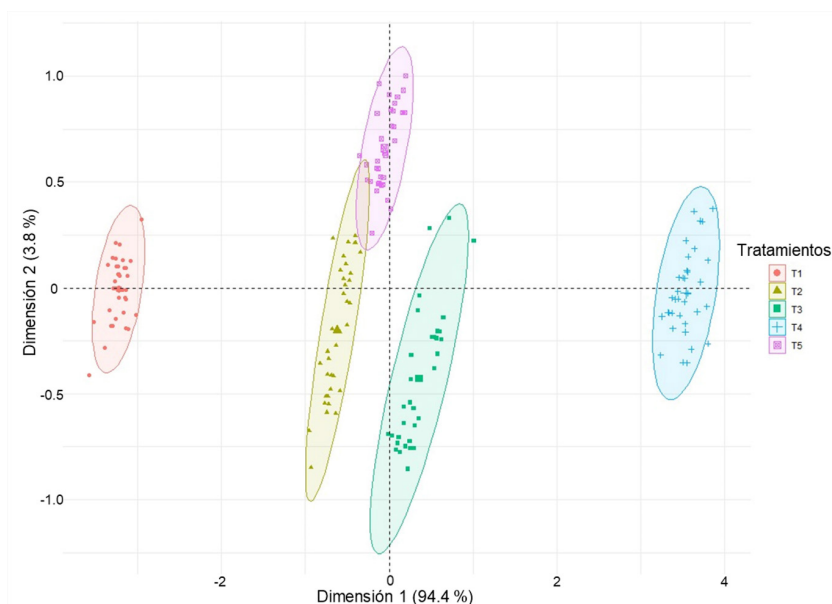


Figura 5. Análisis de componentes principales de las variables del desarrollo fisiológico (HP, NN, NH, MF y MS). T1: agar; T2: MS; T3: 50 % MS; T4: WPM; T5: 50 % WPM.

Producción de masa fresca y seca, correlación y PCA de las variables

La producción de masa fresca y seca es fundamental porque demuestra la capacidad que tienen los explantes para formar tejido. En esta investigación se encontró que la mayor cantidad de masa fresca y masa seca se produjo con la utilización WPM en un periodo de 120 días, con lo cual se obtuvieron 192.8 mg/planta y 24.1 mg/planta de MF y MS, respectivamente.

Resultados semejantes fueron reportados por Gonzales-Alvarado y Cardoso (2024) en *Melaleuca alternifolia*, quienes obtuvieron los mayores valores de MF (180 mg/planta) y MS (15 mg/planta) en condiciones ambientales similares a las de esta investigación. Por el contrario, el tratamiento T1 obtuvo los valores más bajos (56 mg/planta; 7 mg/planta) de MF y MS, respectivamente. Este resultado se debe a que este tratamiento no recibió ningún medio de cultivo, el cual actúa como fuente nutricional para el desarrollo vegetal.

Los resultados obtenidos respaldaron nuestra hipótesis, demostrando que el uso de medios de cultivo resultó superior en comparación con el testigo compuesto únicamente por agar. En particular, el medio de cultivo WPM destacó al proporcionar las mejores respuestas fisiológicas. Por otro lado, las plantas germinadas exclusivamente en agar dependieron de las reservas nutricionales de la semilla para su desarrollo. Sin embargo, la falta de nutrientes esenciales en el medio afectó significativamente su crecimiento, lo que se reflejó en una menor MF y MS (55.6 mg/planta y 6.9 mg/planta, respectivamente). Estos resultados coinciden con los reportados por Gonzales-Alvarado *et al.* (2022).

El análisis de correlación entre las variables identificó correlaciones positivas absolutas (1 ***) entre HP y MF, HP y MS y MF y MS (figura 4). Resultados similares fueron reportados por Gonzales-Alvarado y Cardoso (2024); Sarropoulou *et al.* (2023); Bello-Bello *et al.* (2016) en especies de *Melaleuca alternifolia*, Cereza y *Vanilla planifolia*, respectivamente, quienes observaron altas correlaciones positivas entre las variables analizadas. Estos hallazgos subrayan la importancia de la correlación entre la altura de la planta y la masa fresca y la masa seca, la cual refleja el crecimiento y desarrollo saludables de las plantas en medios de cultivos apropiados para esta especie, como es el WPM.

Conclusiones

Se determinó que el agar permite mayor tasa de germinación (63.28 %) y que el WPM favoreció el desarrollo fisiológico de *Guazuma crinita*, pues alcanzó los valores más altos en todas las variables evaluadas: HP (altura de la planta) 17.59 cm/planta, NN (número de nudos) 5.25 nudos/planta, NH (número de hojas) 6.18 hojas/planta, MF y MS (masa fresca y seca) 192.8 mg/planta y 24.1 mg/planta, respectivamente.

Estos resultados subrayan la relevancia de seleccionar medios de cultivo adecuados para optimizar tanto la germinación como el desarrollo fisiológico de *G. crinita*. Las principales contribuciones de esta investigación abren nuevas posibilidades para el mejoramiento genético y la propagación *in vitro*. En investigaciones futuras sería relevante explorar la optimización de otros factores fisiológicos, como el potencial osmótico del medio de cultivo, los azúcares clave para el desarrollo de las plantas, así como la

adaptación a diferentes condiciones ambientales. Además, el análisis molecular de las respuestas al estrés en estos medios podría contribuir a mejorar la eficiencia del crecimiento y la capacidad de respuesta de *G. crinita* ante condiciones adversas.

Agradecimientos

Agradecemos al Fondo de Desarrollo Socioeconómico de Camisea (FOCAM) de la Universidad Nacional de Ucayali por el financiamiento de esta investigación, aprobada mediante la Resolución N° 990-2022-UNU-CU-R. También extendemos nuestro agradecimiento a los colaboradores que participaron en las fases de campo y gabinete, así como a los revisores anónimos por sus valiosas sugerencias para mejorar este manuscrito.

Referencias

- Al-Mayahi, A. M. W. y Ali, A. (2021). Effects of different types of gelling agents on *in vitro* organogenesis and some physicochemical properties of date palm buds, Showathy cv. *Folia oecologica*, 48(1), 110-117. <https://doi.org/10.2478/foecol-2021-0012>.
- Arévalo-Hernández, C.; Arévalo-Gardini, E.; Correa V. J.; Souza Júnior, J. y Neves, J. (2024). Soil characteristics and allometric models for biometric characteristics and nutrient amounts for high yielding "Bolaina" (*Guazuma crinita*) trees. *Scientific Reports*, 14(1), 2444. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52790-1>.
- Bello-Bello, J. J.; Martínez-Estrada, E.; Caamal-Velázquez, J. H. y Morales-Ramos, V. (2016). Effect of LED light quality on *in vitro* shoot proliferation and growth of vanilla (*Vanilla planifolia* Andrews). *African Journal of Biotechnology*, 15(8), 272-277. <https://doi.org/10.5897/AJB2015.14662>.
- Casas, G. G.; Gonzáles, D. G. E.; Villanueva, J. R. B.; Fardin, L. P. y Leite, H. G. (2022). Configuration of the deep neural network hyperparameters for the hypsometric modeling of the *Guazuma crinita* Mart. in the Peruvian Amazon. *Forests*, 13(5), 697. <https://doi.org/10.3390/f13050697>.
- Cassells, A. C. y Curry, R. F. (2001). Oxidative stress and physiological, epigenetic and genetic variability in plant tissue culture: Implications for micropropagators and genetic engineers. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 64, 145-157. <https://doi.org/10.1023/A:1010692104861>.
- Chen, B.; Li, J.; Zhang, J.; Fan, H.; Wu, L. y Li, Q. (2016). Improvement of the tissue culture technique for *Melaleuca alternifolia*. *Journal of Forestry Research*, 27, 1265-1269. <https://doi.org/10.1007/s11676-016-0301-7>.
- Daffalla, H. M.; Ali, K. S.; Osman, M. G. y Yahya, Y. O. (2022). Rapid germination and development of *Acacia sieberiana* DC *in vitro*. *Notulae Scientia Biologicae*, 14(2), 11176. <https://doi.org/10.55779/nsb14211176>.
- Ferreira, D. F. (2019). SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. *Brazilian Journal of Biometrics*, 37(4), 529-535. <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>.
- Github. (s. f.). quillt. Github. <https://github.com/rstudio/quillt>.
- Gonzales-Alvarado, A. C. y Cardoso, J. C. (2024). Development, chlorophyll content, and nutrient accumulation in *in vitro* shoots of *Melaleuca alternifolia* under light wavelengths and 6-BAP. *Plants*, 13(20), 2842. <https://doi.org/10.3390/plants13202842>.
- Gonzales-Alvarado, A. C.; Mori-Vasquez, J. A.; Tuisima-Coral, L. L. y Revilla-Chávez, J. M. (2022). Influencia de la desinfección, medios de cultivo y fitohormonas en el desarrollo morfogénico *in vitro* de germoplasma de *Guazuma crinita* Mart. *Folia Amazónica*, 31(1), 57-70. <https://doi.org/10.24841/fa.v31i1.572>.
- Harry, I. S. y Thorpe, T. A. (1994). Regeneration of plantlets through organogenesis from mature embryos of jack pine. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 37, 159-164. <https://doi.org/10.1007/BF00043610>.
- Hechavarría-Pérez, L.; Rascón-Valenzuela, L. A.; Tejeda-Mansir, A.; Pérez-Burgos, J. A. y Ayala-Astorga, G. I. (2023). Composición química, actividad antioxidante, antiinflamatoria y antiproliferativa del extracto de callos derivado de *Acalypha californica* Benth. *Polibotánica*, 56, 203-223. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.56.11>.
- Jayusman, L. y Dalimunthe, A. (2022). Season, basal media and plant growth regulators effect in wood plant *in vitro* propagation: A comprehensive review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1115(012051). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1115/1/012051>.
- Lantos, C.; Jancsó, M.; Székely, Á.; Szalóki, T.; Venkatanagappa, S. y Pauk, J. (2023). Development of *in vitro* anther culture for doubled haploid plant production in indica rice (*Oryza sativa* L.) genotypes. *Plants*, 12(9), 1774. <https://doi.org/10.3390/plants12091774>.
- Lloyd, G. y McCown, B. (1980). Commercially-feasible micropropagation of mountain laurel, *kalmia latifolia*, by use of shoot-tip culture. *Combined Proceedings-International Plant Propagator's Society*, 30, 421-427.
- Maruyama, E. (2002). Cryopreservation of *Guazuma crinita* Mart. (*Guazuma*). En Towill, L. E., Bajaj, Y. P. S. (eds.) *Cryopreservation of plant germplasm II. Biotechnology in agriculture and forestry*, vol. 50. Berlín, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04674-6_18.
- Maruyama, E.; Ishii, K.; Kinoshita, I.; Ohba, K. y Saito, A. (1997). Micropropagation of *Guazuma crinita* Mart. By root and petiole culture. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 33, 131-135. <https://doi.org/10.1007/s11627-997-0011-0>.
- Maruyama, E.; Kinoshita, I.; Ishii, K.; Shigenaga, H.; Ohba, K. y Saito, A. (1997). Alginate-encapsulated technology for the propagation of the tropical forest trees: *Cedrela odorata* L., *Guazuma crinita* Mart., and *Jacaranda mimosaeifolia* D. Don, by shoot tip encapsulation in calcium-alginate and storage at 12-25°C. *Plant Cell Reports*, 16, 393-396. <https://doi.org/10.1007/BF01146780>.
- Micheli, M.; Prosperi, F.; Facchin, S. y Fernandes, D. (2020). Safeguard of plant germplasm through the *in vitro* culture. *Horticulture International Journal*, 4(2), 50-52. <https://doi.org/10.15406/HIJ.2020.04.00157>.
- Murashige, T. y Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiologia plantarum*, 15(3), 473-497. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1962.tb08052.x>.
- Nowakowska, K.; Pacholczak, A. y Tepper, W. (2019). The effect of selected growth regulators and culture media on regeneration of *Daphne mezereum* L. 'Alba'. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 30, 197-205. <https://doi.org/10.1007/s12210-019-00777-w>.

- Parada, P. D. M. y Villegas, M. A. (2009). In vitro propagation of almond x peach hybrid H1. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 32(2), 103-109.
- Rafael Quille, J. L. (2023). Efecto de los niveles de sacarosa y sales en la multiplicación *in vitro* de castaña (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) - Puerto Maldonado - Madre de Dios - 2020. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios. Madre de Dios, Perú].
- Revilla Chávez, J. M.; Abanto-Rodríguez, C.; Guerra Arévalo, W. F.; García Soria, D.; Guerra Arévalo, H.; Domínguez Torrejón, G.; Gabriel da Silva y Carmo, I. L. (2021). Modelos alométricos para estimar el volumen de madera de *Guazuma crinita* en plantaciones forestales. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 25-31. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.003>.
- Rodríguez, M.; Chacón, M. y Carrillo, R. (2014). Efecto de la concentración y de los componentes del medio de cultivo MS sobre la germinación *in vitro* de *Ugni molinae*. *Bosque (Valdivia)*, 35(1), 119-122. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002014000100012>.
- Sakr, N. (2022). In vitro methodology to assess quantitative resistance in plant-fungus pathosystems. *The Open Agriculture Journal*, 17(1), E187433152210120. <https://doi.org/10.2174/18743315-v16-e221020-2022-HT14-3623-4>.
- Sarropoulou, V.; Sperdouli, I.; Adamakis, I.-D. y Grigoriadou, K. (2023). The use of different LEDs wavelength and light intensities for in vitro proliferation of cherry rootstock: Influence on photosynthesis and photomorphogenesis. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 152(2), 317-330. <https://doi.org/10.1007/s11240-022-02408-z>.
- Sir El-Khatim, A. K.; Daffalla, H. M.; Osman, M. G. y Musa, A. (2022). Germination and early growth of *Acacia nubica* Benth. *in vitro*, 2022120385. <https://doi.org/10.20944/preprints202212.0385.v1>.
- Stephen, C.; Zayas, V. A.; Galic, A. y Bridgen, M. P. (2023). Micropropagation of hemp (*Cannabis sativa* L.). *HortScience*, 58(3), 307-316. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI16969-22>.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I. M. y Murphy, A. (2017). *Fisiología e desenvolvimento vegetal*. São Paulo: Artmed Editora.
- Tar, K. Y. K.; Naing, A. H.; Ai, T. N.; Chung, M. Y. y Kim, C. K. (2018). Optimization of factors influencing in vitro immature seed germination in *Chionanthus retusus*. *Journal of Plant Biotechnology*, 45(4), 347-356. <https://doi.org/10.5010/JPB.2018.45.4.347>.
- Tombion, L.; Coviella, M. A.; Pannunzio, M. J.; Soto, M. S. y Bologna, P. (2023). Germinación *in vitro* de *Calibrachoa thymifolia* y *Calibrachoa missionica* nativas de la Argentina. *Tecnología en Marcha*, 36(3), 127-133. <https://doi.org/10.18845/tm.v36i3.6142>.
- Tuisima-Coral, L. L.; Hlásná Čepková, P.; Weber, J.C. y Lojka, B. (2020). Preliminary evidence for domestication effects on the genetic diversity of *Guazuma crinita* in the Peruvian Amazon. *Forests*, 11(8), 795. <https://doi.org/10.3390/f11080795>.

Compuestos fenólicos obtenidos de chile (*Capsicum* sp.) para el control de la oxidación y el deterioro bacteriano en la carne y en productos cárnicos: revisión

Phenolic compounds obtained from chili pepper (*Capsicum* sp.) for the control of oxidation and bacterial spoilage in meat and meat products: A review

Alfredo Varela-Esquer ^{1,4}, Saul Ruíz-Cruz ^{2,5}, Luis A. Cira-Chávez ^{1,6}, María Isabel Estrada-Alvarado ^{1,7}, Enrique Márquez-Ríos ^{2,8}, Martín Valenzuela Melendres ^{3,9}.

¹Instituto Tecnológico de Sonora. Ciudad Obregón, México. ²Universidad de Sonora. Hermosillo, México. ³Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A.C. Hermosillo, México. ⁴✉ alfredovesquer@hotmail.com; ⁵✉ saul.ruizcruz@unison.mx; ⁶✉ luis.cira@itson.edu.mx; ⁷✉ mestrada@itson.edu.mx; ⁸✉ enrique.marquez@unison.mx; ⁹✉ martin@ciad.mx



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.116807>

2024 | 73-1 p 25-39 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-09-30 Acep.: 2024-12-20

Resumen

Los cultivos de chile (*Capsicum* sp.) tienen una relevancia económica significativa a nivel global, pero también generan una gran cantidad de subproductos a lo largo de la cadena de producción, muchos de los cuales no se utilizan y representan un desafío ambiental. Recientes investigaciones destacan que estos subproductos vegetales son una fuente rica en fitoquímicos, particularmente en compuestos fenólicos, los cuales poseen propiedades antioxidantes y antimicrobianas. En paralelo, la demanda de los consumidores por alternativas más saludables a los alimentos procesados ha impulsado la búsqueda de reemplazos naturales para antioxidantes y conservantes sintéticos, como el BHA, BHT y los nitritos, los cuales se asocian con riesgos para la salud, incluidas enfermedades inflamatorias y cardiovasculares. Ingredientes de origen vegetal, como los compuestos fenólicos presentes en el chile, tienen el potencial de generar alimentos más saludables y naturales, lo que contribuye a la reducción de enfermedades crónicas, incluyendo el cáncer. Estas propiedades sugieren que el chile y sus subproductos podrían ser utilizados como aditivos naturales para reemplazar moléculas sintéticas en productos cárnicos. No obstante, su implementación a gran escala enfrenta desafíos debido a la variabilidad en los sabores, colores y aromas que el chile puede aportar, lo cual puede afectar la consistencia en la calidad de los productos cárnicos. A pesar de estas limitaciones, estudios recientes han demostrado que los chiles pueden mejorar el color, sabor y textura de los productos cárnicos, al tiempo que ofrecen estabilidad frente a la oxidación y el deterioro microbiano. Por lo tanto, los compuestos fenólicos del chile se perfilan como una alternativa prometedora a los aditivos sintéticos en la industria cárnica.

Palabras clave: conservantes naturales, extracción, fitoquímicos, oxidación, productos cárnicos reformulados.

Abstract

Chili pepper (*Capsicum* sp.) cultivation holds significant economic importance worldwide, but it also generates a substantial number of by-products throughout the production chain, many of which go unused and pose environmental challenges. Recent research has shown that these plant by-products are rich in phytochemicals, particularly phenolic compounds, which have antioxidant and antimicrobial properties. Concurrently, consumer demand for healthier alternatives to processed foods has driven the search for natural replacements for synthetic antioxidants and preservatives like BHA, BHT, and nitrites, which are associated with health risks, including inflammatory and cardiovascular diseases. Plant-based ingredients, such as the phenolic compounds found in chili peppers, have the potential to formulate healthier and more natural foods, contributing to the reduction of chronic diseases, including cancer. These properties suggest that chili peppers and their by-products could be used as natural additives to replace synthetic molecules in meat products. However, large-scale implementation is challenging due to the variability of flavors, colors, and aromas that chili peppers can impart, which may affect the consistency of meat product quality. Despite these limitations, recent studies have demonstrated that chili peppers can enhance the color, flavor, and texture of meat products while providing stability against oxidation and microbial spoilage. Therefore, phenolic compounds from chili peppers are emerging as a promising alternative to synthetic additives in the meat industry.

Keywords: extraction, natural preservatives, oxidation, phytochemicals, reformulated meat products.

Introducción

Actualmente existe suficiente evidencia antropológica para demostrar que los animales, como un recurso cárnico, han sido la base del desarrollo del ser humano durante miles de años. Las partes de los animales que cumplen la función alimenticia generalmente es llamada carne, pero su definición varía según la fuente. La American Meat Science Association (AMSA) incluye en su definición el músculo esquelético, órganos y tejidos musculares no esqueléticos de mamíferos, aves y otros animales utilizados como alimento (Boler y Woerner, 2017). Flores y Toldrá (2021) limitan la carne a los músculos de mamíferos como reses y cerdos, excluyendo aves y peces, pero incluyen productos cárnicos procesados. Por otro lado, la carne y sus derivados procesados son ricos en nutrientes como vitamina B12, hierro y colesterol, grasas saturadas, sodio y aditivos de origen sintético, vinculados con enfermedades no transmisibles (Aminzare *et al.*, 2019). La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha clasificado la carne roja como “probablemente carcinógena” y los productos cárnicos procesados como “carcinógenos”. Aunque no se ha establecido una cantidad exacta de ingesta ni un umbral seguro de consumo, la IARC sugiere que un aumento de 50 g/día en el consumo de carne procesada, como jamón, tocino y salchichas, incrementa el riesgo de cáncer colorrectal (IARC, 2018). Por tal motivo, parte de la población relaciona a la carne y a los productos cárnicos procesados como alimentos potencialmente preocupantes y dañinos para la salud (Ozaki *et al.*, 2021).

La industria cárnica enfrenta desafíos significativos debido a la oxidación y la contaminación microbiana, las cuales alteran el color, sabor, olor y textura de los productos, y afectan su calidad y aceptación por parte de los consumidores (Domínguez *et al.*, 2019). La oxidación de lípidos y Fe (II) en hemoproteínas se desencadena por la exposición a radicales libres durante el procesamiento y almacenamiento, lo que resulta en la formación de compuestos como la metamioglobina, responsable del cambio de color de rojo a pardusco, y la pérdida de propiedades nutricionales y funcionales (Ribeiro *et al.*, 2019). Para mitigar este deterioro, la industria ha buscado satisfacer las necesidades de los consumidores y cumplir con las leyes y normativas a través de la adopción de tecnologías como las cadenas de frío y el uso de aditivos conservantes, tanto naturales como sintéticos, para extender la vida útil de los productos y garantizar su calidad (Kalogianni *et al.*, 2020).

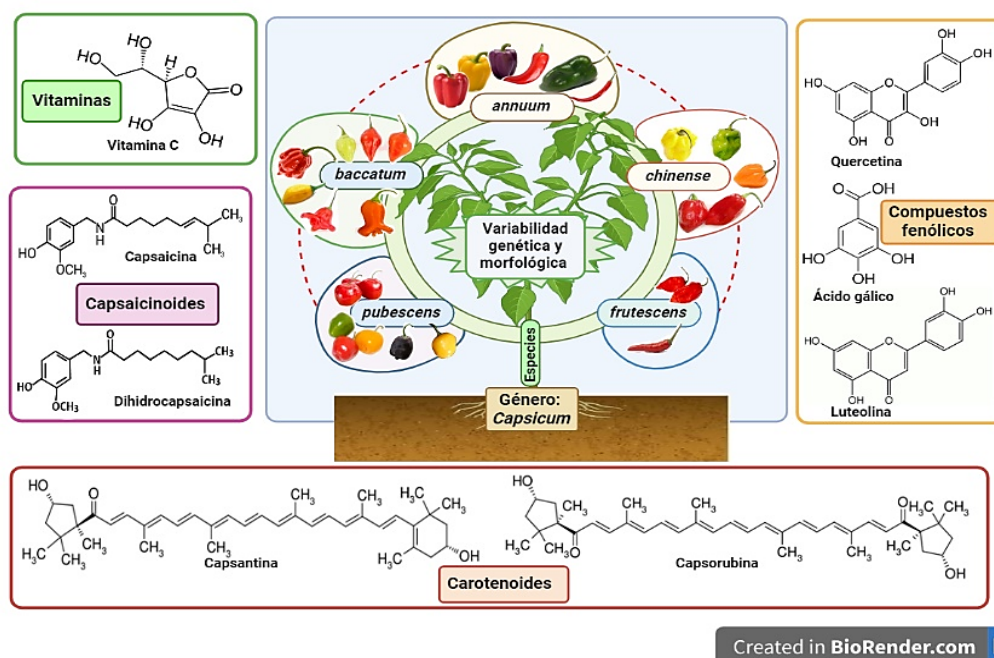
Durante décadas, la industria ha utilizado aditivos antioxidantes sintéticos como butilhidroxitolueno (BHT), butilhidroxianisol (BHA), terbutilhidroxiquinona (TBHQ), nitratos y nitritos, que han demostrado ser eficaces en la conservación de

productos cárnicos al inhibir la oxidación y combatir patógenos como *Clostridium perfringens* y *Clostridium botulinum* (Alirezalu *et al.*, 2021). Sin embargo, el uso de nitritos está relacionado con la formación de nitrosaminas, compuestos potencialmente cancerígenos que incrementan el riesgo de tumores. Esto ha impulsado el uso de aditivos naturales que no representen riesgos para la salud (Draszanowska *et al.*, 2021). En este contexto, los compuestos fenólicos de origen vegetal han emergido como alternativas prometedoras en alimentos y productos cárnicos, debido a sus propiedades antioxidantes y antibacterianas (Bellucci *et al.*, 2021; Qin *et al.*, 2021).

Los compuestos fenólicos son moléculas abundantes en el reino vegetal, y están presentes en frutas, verduras, semillas y cortezas. Son una familia con múltiples tipos de moléculas y subgrupos que constan de uno o más grupos hidroxilo conectados en al menos un anillo aromático (Cutrim y Cortez, 2018). Investigaciones indican que polifenoles como el resveratrol, galato de epigallocatequina y la quercetina poseen propiedades anticancerígenas y pueden combatir diferentes tipos de cáncer y enfermedades cardiovasculares (Farahmandfar *et al.*, 2019). También tienen propiedades antioxidantes y antimicrobianas, lo que las convierte en alternativas viables a los aditivos sintéticos (Ribeiro *et al.*, 2019). Por su parte, el género *Capsicum*, de la familia Solanaceae, incluye especies como *C. pubescens*, *C. baccatum*, *C. frutescens*, *C. chinense* y *C. annuum* (Figura 1). Esta última es de las más importantes económicamente, con aproximadamente 50 000 variedades (Hernández-Pérez *et al.*, 2020) y en la última década su producción mundial alcanzó 24.9 millones de toneladas, con un crecimiento anual del 6.26 % (Echave *et al.*, 2020).

Actualmente se están realizando esfuerzos para valorizar los subproductos de la industria agroalimentaria mediante la extracción de moléculas que puedan utilizarse como aditivos naturales. Este enfoque no solo genera ingresos para la industria, sino que también reduce la contaminación ambiental y proporciona fitoquímicos activos beneficiosos para la salud humana (Sowbhagya, 2019). Los subproductos del chile, como semillas, hojas, tallos y pulpa inutilizable, son generalmente desechados o quemados tras la cosecha e industrialización. Por ejemplo, la producción de chile habanero genera millones de plantas y pedúnculos que terminan como residuos (Chel-Guerrero *et al.*, 2021).

El chile jalapeño es uno de los más consumidos en México, con una producción anual de alrededor de 836 246 ton/año, principalmente destinados a la industria de los encurtidos. En este proceso, se generan aproximadamente 500 ton de subproductos como semillas y placenta, que aún no han sido explotados industrialmente, a pesar de que estudios de laboratorio han confirmado su riqueza en compuestos fenólicos como rutina, epicatequina y catequina (Sandoval-Castro *et al.*, 2017). Las semillas



Created in BioRender.com bto

Figura 1. Estructura básica de algunos compuestos bioactivos que se encuentran en los chiles. Elaboración propia con información de Hernández-Pérez et al., (2020).

del chile son una fuente importante de vitaminas, ácidos grasos, pigmentos y compuestos fenólicos como ácido cafeico, ácido gálico, rutina, catequina y epicatequina. Estos subproductos poseen actividad antioxidante, lo que ayuda a prevenir reacciones de oxidación en el cuerpo causadas por radicales libres. Además, sus propiedades antioxidantes y antibacterianas los hacen ideales para aplicaciones en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria (Echave et al., 2020).

Por lo tanto, el objetivo del actual trabajo de revisión es presentar antecedentes sobre la reducción, incluso la sustitución de los antioxidantes sintéticos en los productos cárnicos, así como presentar las propiedades conservantes de los compuestos fenólicos obtenidos de diversas variedades de chiles.

Compuestos bioactivos presentes en el chile

El chile (*Capsicum* sp.) es un fruto ampliamente conocido y consumido en todo el mundo, utilizado principalmente como especia para dar color, sabor y picor a los alimentos (Ferysiuk et al., 2020). Entre las variedades más relevantes se encuentran: habanero, serrano, piquín, jalapeño, poblano y anaheim. En los últimos años, el chile ha ganado popularidad no solo por su uso como condimento, sino también por sus beneficios para la salud, que incluyen propiedades antimicrobianas, antivirales, antiinflamatorias, y antioxidantes (Dinu et al., 2018; Villasante et al., 2020). Gracias a sus propiedades antioxidantes, el consumo

del chile ayuda a reducir la oxidación celular causada por radicales libres, disminuyendo así el riesgo de desarrollar enfermedades asociadas con el estrés oxidativo, como cataratas, cáncer, Alzheimer, diabetes, Parkinson y enfermedades cardiovasculares (Kaur y Kapoor, 2001; Chávez-Mendoza et al., 2015). Estos beneficios se deben principalmente a la presencia de compuestos bioactivos, como carotenoides, vitaminas C y E, minerales, capsaicinoides (capsaicina, dihidrocapsaicina, homodihidrocapsaicina, nordihidrocapsaicina y homocapsaicina) y compuestos fenólicos como los ácidos fenólicos, la quercetina y luteolina (Hernández-Pérez et al., 2020) (Figura 2).

Carotenoides

Son pigmentos naturales que producen las plantas, microorganismos y algas, responsables de los colores amarillo, naranja y rojo en muchos alimentos, como el chile y el tomate. Estos pigmentos no pueden ser sintetizados por animales ni humanos, por lo que deben obtenerse a través de la dieta. Además de aportar color, los carotenoides actúan como antioxidantes, por lo cual protegen las células de la oxidación causada por radicales libres (Çinar, 2005). Durante la maduración de los frutos del chile, los cloroplastos se transforman en cromoplastos, aumentando la concentración de carotenoides y reduciendo las clorofilas (Hernández-Pérez et al., 2020). Entre los principales carotenoides presentes en *Capsicum* sp. se incluyen capsantina, capsorubina, zeaxantina, β -criptoxantina y β -caroteno (Mohd et al., 2019).

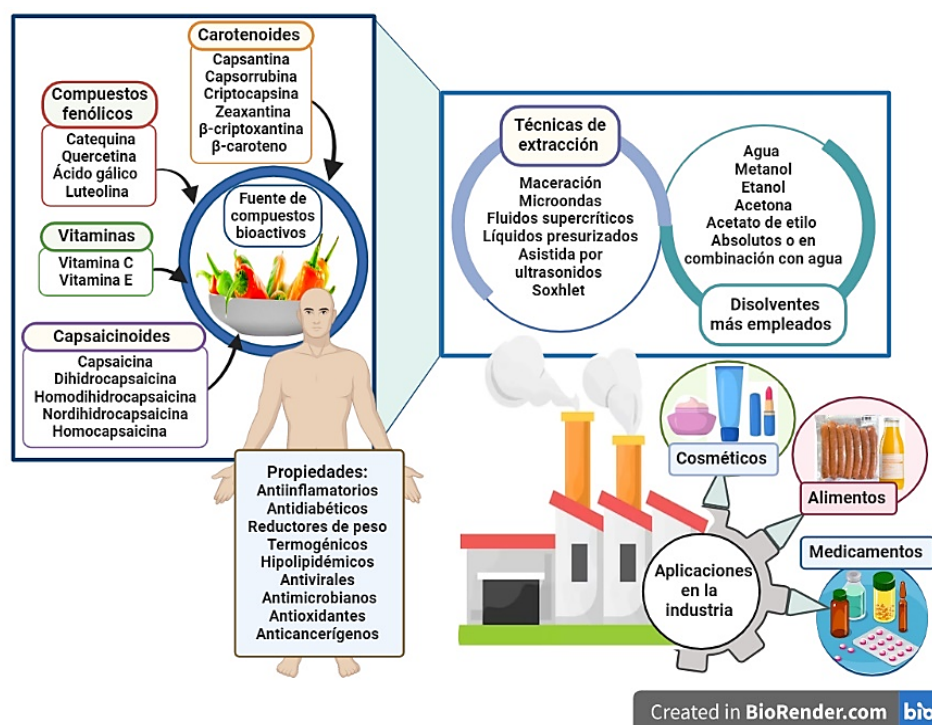


Figura 2. Representación esquemática de la extracción de los compuestos bioactivos presentes en *Capsicum* sp., y sus propiedades bioactivas. Elaboración propia con información de (Hernández-Pérez et al., 2020; Alara et al., 2021).

Vitaminas

Los frutos del chile son una fuente significativa de vitamina C, vitamina E y provitamina A. La vitamina C es esencial para funciones biológicas como la producción de colágeno, hormonas peptídicas y aminoácidos, además, tiene propiedades antioxidantes que pueden reducir el riesgo de enfermedades como el Alzheimer y varios tipos de cáncer (Hamed et al., 2019). La vitamina E, un potente antioxidante liposoluble, protege la piel contra el daño oxidativo y previene la aparición de artritis y cataratas. En los frutos de *Capsicum pubescens* la vitamina E se encuentra principalmente en forma de α -tocoferol, con concentraciones que varían entre 6.8 y 18.4 mg/100 g, mientras que el β -tocoferol está presente en niveles menores (Antonious, 2018).

Capsaicinoides

Los frutos de *Capsicum* sp. contienen capsaicinoides, que son fitocompuestos característicos responsables del picor. Estos metabolitos, producidos exclusivamente por las células epidérmicas de la placenta del fruto, incluyen capsaicina, dihidrocapsaicina, nordihidrocapsaicina, homodihidrocapsaicina y homocapsaicina, dentro de las cuales la capsaicina y dihidrocapsaicina son las más potentes en términos

de pungencia, pues representan hasta el 90 % del total de capsaicinoides. Más allá del picor, los capsaicinoides tienen propiedades beneficiosas para la salud, incluido su uso como tratamiento para la artritis reumatoide, trastornos inflamatorios y como protección contra patógenos como *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes* y *Salmonella* (Hamed et al., 2019).

Compuestos fenólicos

Los compuestos fenólicos, una familia de aproximadamente 8000 fitoquímicos, se encuentran en frutas y verduras, donde actúan como defensa ante el estrés ambiental, como la exposición a rayos UV y las infecciones (Cosme et al., 2020). En los chiles que incluyen más de 200 variedades dentro de 5 especies domésticas (*C. baccatum*, *C. pubescens*, *C. chinense*, *C. frutescens* y *C. annuum*), la composición y contenido de estos compuestos varía según la madurez, el clima y las condiciones de cultivo (Hamed et al., 2019). Por ejemplo, estudios han demostrado que los chiles picantes verdes contienen 4965.2 mg equivalentes de ácido gálico por kilogramo (mg EAG/kg), mientras que los chiles rojos picantes alcanzan los 8233.7 mg EAG/kg (Dinu et al., 2018). Estos compuestos han ganado importancia por su capacidad antioxidante, que ayuda a prevenir enfermedades relacionadas con el estrés oxidativo. De igual manera, se le atribuyen

propiedades antimicrobianas contra patógenos que incluyen bacterias del género *Bacillus* y hongos del género *Aspergillus* y *Penicillium* (Ferysiuk et al., 2020). Por lo tanto, los compuestos fenólicos se pueden clasificar de diferentes formas, una de las cuales se basa en su importancia para el ser humano; entre ellos, los grupos más importantes son los flavonoides, los taninos y los ácidos fenólicos (Vuolo et al., 2019).

Flavonoides

Los flavonoides, el grupo más amplio de compuestos fenólicos, con unas 4000 variantes, se derivan de las rutas biosintéticas del ácido shikímico y los policétidos en las plantas. Estructuralmente, consisten en un esqueleto difenilpropanoide (C6-C3-C6), compuesto por 2 anillos bencénicos unidos por una cadena de 3 carbonos que forma un heterociclo con oxígeno. Estos compuestos, que contienen grupos hidroxilo, se sintetizan en respuesta al estrés biótico y abiótico. Según su estructura química, se clasifican en chalconas, isoflavonas, flavanonas, flavonoles, flavonas y flavanonoles (Panche et al., 2016). Jiménez-García et al. (2023) informaron valores de 8896.08 y 229.73 µg/g para epicatequina y quercetina, respectivamente, en pimienta dulce.

Ácidos fenólicos

Estos compuestos se agrupan en ácidos hidroxibenzoicos (HBA) y ácidos hidroxicinámicos (HCA). Los HBA tienen una estructura C6-C1 y presentan variaciones en sus anillos aromáticos mediante metoxilaciones e hidroxilaciones (Vuolo et al., 2019). Entre los HBA destacan el ácido salicílico, protocatecuico, vanílico, sirínico, elágico y gálico. Los HCA, con una estructura C6-C3 y un doble enlace lateral, se encuentran usualmente como ésteres simples con glucosa y ácido quínico; entre los más abundantes están el ácido cafeico, p-cumárico, ferúlico y sináptico (Cosme et al., 2020). Jiménez-García et al. (2023) informaron valores de 4229.29, 1353.34 y 98.59 µg/g para el ácido clorogénico, ácido cafeico y ácido sináptico, respectivamente, en pimienta dulce.

Taninos

Los taninos son compuestos fenólicos complejos de sabor astringente, sintetizados por las plantas para repeler herbívoros. Se clasifican en taninos condensados e hidrolizables. Los taninos condensados, o proantocianidinas, no poseen un centro de azúcar y consisten en polímeros de flavonoides (flavan-3-ol o flavan-3,4-diol) unidos por enlaces carbono-carbono, resistentes a la hidrólisis. Los hidrolizables están formados por un núcleo de carbohidrato, generalmente D-glucosa, esterificado total o parcialmente con moléculas como los ácidos fenólicos, entre ellos, el ácido gálico o el elágico (Das et al., 2020). Olatunji y Afolayan (2019) reportaron

valores de proantocianidinas de 709.99 y 629.22 mg/g para *C. annuum* var. *Grossum* y *C. annuum* var. *Acuminatum*, respectivamente.

Técnicas de extracción de compuestos fenólicos

Los frutos del chile son reconocidos por su diversidad en colores, sabores y niveles de picor, además de su contenido en compuestos fenólicos, que son moléculas fitoquímicas con propiedades bioactivas benéficas para la salud humana. Entre los compuestos fenólicos que más destacan en diversas variedades del chile se encuentran el ácido clorogénico, ácido cafeico, la miricetina, quercetina y luteolina (Blanco-Ríos et al., 2013). Sin embargo, la concentración de estos compuestos varía debido a factores como el grado de madurez, condiciones de almacenamiento y tipo de cultivo, así como por la naturaleza de las uniones entre las moléculas fenólicas y la matriz vegetal. Estas moléculas pueden encontrarse como agliconas o glucósidos, estructurados de forma monomérica o polimerizada, lo que complica su extracción (Alara et al., 2021). Por tanto, la elección de la técnica de extracción adecuada es crucial para evitar la degradación de estos compuestos y maximizar su recuperación. Esta sección se enfocará en revisar las técnicas de extracción de compuestos fenólicos utilizadas en frutos de distintas variedades de chiles (Tabla 1).

Actualmente se emplean diversas tecnologías para la extracción de compuestos fenólicos en chiles; el primer paso crucial es la selección de un solvente adecuado, ya sea puro o en combinación. Los solventes más utilizados incluyen etanol, metanol, agua, acetona y acetato de etilo, aunque debido a la toxicidad del metanol, el etanol es preferido, especialmente en la industria alimentaria (Tanase et al., 2019). La solubilidad y concentración de los compuestos fenólicos dependen de la polaridad del solvente. Los compuestos polares se disuelven mejor en solventes acuosos, mientras que los alcohólicos, como el etanol en concentraciones de 50, 70 y 80 % disueltos en agua, permiten la extracción de compuestos con polaridad variable, por lo cual es identificado como el solvente óptimo para esta tarea (Assis et al., 2019; Villasante et al., 2020). Sin embargo, la extracción con solventes es una técnica no selectiva, capaz de extraer tanto compuestos hidrofílicos como lipofílicos, lo que puede incluir clorofilas, carotenos, vitamina C y azúcares, además de los compuestos fenólicos (Ferysiuk et al., 2020). Para optimizar la extracción es fundamental considerar factores como el volumen del solvente, tiempo, temperatura, relación solvente/muestra y la técnica de extracción empleada, entre las que destacan la maceración, el microondas, los fluidos supercríticos, los líquidos presurizados y la extracción asistida por ultrasonidos (EAU) y Soxhlet (De Aguiar et al., 2019; Al Khalaf et al., 2020).

Tabla 1. Técnicas y condiciones de extracción aplicadas en la recuperación de compuestos fenólicos de matrices vegetales

Variedad del chile	Técnica de extracción	Solvente	Condiciones	Relación solvente/muestra	Recuperación	Unidades	Referencias
Habanero semilla, pericarpio y fruto Serrano semilla, pericarpio y fruto	SOX	Metanol	180 min	70 mL/3 g	3.18, 34.07 y 232.51 46.25, 144.18 y 336.42	mg EAG/100 g PS	Cerón-Carrillo et al. (2017).
Péndulo dedo de moça	EFS asistida con US. EFS	CO ₂	Presiones (15, 20 y 25 MPa), Temperatura (40 °C), potencias ultrasónicas (200, 400 y 600 W), tiempos (40, 60 y 80 min), caudal másico del CO ₂ de 1.7569 x 10 ⁻⁴ kg/s. Temperaturas (40, 50 y 60 °C), presiones (15, 20 y 25 MPa), caudal másico del CO ₂ de 1.7569 x 10 ⁻⁴ kg/s.	5 g	0.13 a 0.62 0.07 a 0.23	mg EAG/g PS	Dias et al. (2016).
Capsicum frutescens	EFS	CO ₂	Temperatura (35 °C), presión (100 bar), tiempo (30 min), diclorometano (5 mL)	10 g	705.90	mg EAG/g EXT	Farahmandfar et al. (2017).
Jalapeño crudo y escaldado	EAU	Etanol al 80 %	30 min	40 mL/500 mg	10.01 y 13.09	g EAG/kg PS	Sandoval-Castro et al. (2017).
Chile pimiento Biquinho	ELP pretratado con EFS. ELP	ELP (etanol al 50, 75 y 100 %) y EFS (CO ₂). ELP (etanol al 50, 75 y 100 %).	EFS (15 MPa, 50 °C, caudal de 2.43 x10 ⁻⁴ kg/s, durante 120 min) y ELP (10 MPa, 60 min; caudales para el solvente fueron de 3.30, 3.52 y 3.82 mL/min para el etanol al 50, 75 y 100 %, respectivamente y caudal másico de 3.0 g/min).	15 g	8.0 a 11.95 23.4 a 31.5	mg EAG/g MP mg EAG/g EXT	De Aguiar et al. (2019).
Péndulo	SOX	Etanol al 70 %	4 h	1 g/10 mL	7.45 a 985.33	Mg EAG/g EXT	Assis et al. (2019).
Capsicum annum	SOX. EAM	Acetona Acetona al 50 % Agua	5 h a 50 °C 5 h a 70 °C Horno de 80 W, 2 min a 98 °C	350 g 50 g	1.03 0.81 0.75	Mg EAG/mL	Al Khalaf et al. (2020).
Morrón var. Aifos	EAU	Etanol al 80 %	10 min	10 mL/1 g	139.45	mgAC/g ES	Ferysiuk et al. (2020).
Morrón	EAU	Etanol al 50 %	30 min a 50 °C	10 mL/1 g	7.03	Mg EAG/g PS	Villasante et al. (2020).
Péndulo	SOX	Etanol al 70 %	4 h	10 mL/1 g	274.35	Mg EAG/g EXT	Cabral et al. (2021).

*EAU: Extracción asistida por ultrasonido; SOX: Soxhlet; EFS: fluidos supercríticos; US: ultrasonidos; ELP: extracción con líquidos presurizados; EAM: extracción asistida por microondas; mg: miligramos; mL: mililitros; g: gramos; °C: grados Celsius; h: horas; min: minutos; MPa: megapascal; W: watts; kg/s: kilogramos por segundo; EAG: equivalente de ácido gálico; AC: ácido clorogénico; PF: peso fresco; PS: peso seco; EXT: extracto; MP: muestra pretratada; ES: extracto seco.

Fuente: elaboración propia.

Maceración

La maceración es una técnica convencional de extracción como lo son la digestión, la percolación, la decocción, la infusión y Soxhlet. Este proceso implica sumergir en un solvente una matriz previamente pulverizada, controlando factores como agitación, temperatura, iluminación y tiempo para optimizar la extracción. Después del tiempo de extracción es necesario separar la fase sólida de la líquida mediante decantación, clarificación o filtración (Alara et al., 2021). Aunque es un método sencillo, presenta desventajas como el elevado volumen de solvente necesario, baja recuperación del solvente y tiempos prolongados de extracción (Tanase et al., 2019).

Extracción asistida por ultrasonido (EAU)

La extracción asistida por ultrasonido (EAU) es una técnica eficaz para extraer compuestos fenólicos de matrices complejas como los chiles, aprovechando el fenómeno de cavitación acústica. Este proceso se desencadena cuando las ondas sonoras generan la formación, crecimiento y colapso rápido de burbujas en el solvente, lo que aumenta la temperatura y la presión localizadas, facilitando la ruptura de la pared celular vegetal y aumentando el área de contacto entre las partículas vegetales y el solvente. Esto mejora la transferencia de compuestos fenólicos al solvente (Azmir et al., 2013).

Extracción asistida por microondas (EAM)

La extracción asistida por microondas (EAM) es una técnica moderna que utiliza la energía de radiación de microondas para calentar una muestra disuelta en un solvente, lo que facilita la extracción de compuestos bioactivos. El rango de frecuencia en la que operan las microondas es de 300 MHz a 300 GHz, y su energía se distribuye en 2 campos: uno magnético y otro eléctrico. Estos campos inducen la conducción iónica y la rotación de dipolos en los compuestos polares generando calor (Azmir *et al.*, 2013). Este proceso provoca un aumento en la presión y la temperatura, que favorecen la disociación de compuestos en la matriz vegetal y su transferencia al solvente. Los solventes adecuados para este método son aquellos que absorben eficientemente la energía de las microondas: etanol, metanol y agua, mientras que solventes como el hexano y diclorometano son inadecuados debido a su inestabilidad térmica bajo radiación de microondas (Alara *et al.*, 2021).

Extracción con fluidos supercríticos (EFS)

La extracción con fluidos supercríticos (EFS) utiliza fluidos en condiciones de temperatura y presión por encima de su punto crítico, lo que les confiere una densidad similar a la de los líquidos, pero con la viscosidad de los gases y una capacidad de difusión intermedia. Estas propiedades permiten una penetración más eficiente y rápida en las matrices vegetales, lo que mejora la extracción de compuestos bioactivos (Al Jitan *et al.*, 2018). El dióxido de carbono (CO_2) es el solvente más comúnmente empleado en EFS debido a su no toxicidad, bajo costo, no inflamabilidad y su capacidad para preservar la integridad de las moléculas durante la extracción. Sin embargo, el CO_2 no es eficaz para extraer compuestos polares, por lo que se suele añadir un codisolvente, como el etanol o el metanol, para mejorar la eficiencia de extracción (Abhari y Khaneghah, 2020).

Extracción con líquidos presurizados (ELP)

La ELP es una técnica que se realiza a presiones entre 35 y 200 bar, y temperaturas de 50 a 200 °C. Estas condiciones permiten que el solvente permanezca en estado líquido por debajo de su punto de ebullición, aumentando su permeabilidad y eficacia en la extracción (Abhari y Khaneghah, 2020).

Soxhlet

La técnica Soxhlet, desarrollada por Franz Ritter Von Soxhlet en 1879, fue inicialmente diseñada para la extracción de lípidos, pero actualmente se utiliza también para extraer compuestos fenólicos y otras

moléculas bioactivas, por lo que es considerada la técnica de referencia en comparación con métodos modernos de extracción (Azmir *et al.*, 2013). La extracción Soxhlet se basa en la lixiviación, donde la muestra pulverizada se somete a un solvente, permitiendo la separación continua de los compuestos deseados. Una de sus principales ventajas es el uso eficiente de solventes, lo que requiere menor volumen y tiempo en comparación con técnicas como la maceración. Además, es compatible con una variedad de solventes, incluidos propanol, acetona, cloroformo, acetato de etilo, n-hexano, metanol, etanol y agua (Alara *et al.*, 2021).

Composición química de la carne

La carne, definida como el músculo esquelético comestible de animales como bovinos, ovinos, caprinos, porcinos y aves de corral, es esencial en la dieta humana por su alto valor nutricional. Su composición típica incluye aproximadamente un 75 % de agua, 19 % de proteínas (11.5 % miofibrilares, 5.5 % sarcoplásmicas y 2 % de tejido conectivo), 2.5 % de lípidos, 1.2 % de carbohidratos y 2.3 % de sustancias solubles no proteicas, aunque estos porcentajes pueden variar según la especie (Olaoye, 2011). En su composición se incluyen minerales (hierro y zinc), vitaminas, ácidos grasos y aminoácidos esenciales. Se ha reportado que factores como la dieta animal pueden influir en el perfil de ácidos grasos. La carne roja, por ejemplo, es rica en proteínas (22 %) y contiene ácidos grasos poliinsaturados y trans, como el omega-3 y el ácido linoleico conjugado, que benefician la salud cardiovascular. De igual manera, el hierro varía según el tipo de músculo, y es más abundante en músculos rojos debido a la mayor presencia de mioglobina (Domínguez *et al.*, 2019).

Deterioro de la carne y de los productos cárnicos

La carne, reconocida por su alto valor nutricional, también es susceptible a un rápido deterioro debido a su composición química. Este deterioro afecta propiedades organolépticas como la textura, el color, el sabor, el aroma y la jugosidad, lo que puede llevar a un rechazo por parte de los consumidores. La oxidación de ácidos grasos poliinsaturados es la segunda causa principal de deterioro, después de la contaminación microbiana (Olaoye, 2011; Ozaki *et al.*, 2021). Las especies reactivas de oxígeno (ROS) son radicales libres que se forman de manera natural en los organismos vivos, cuya presencia se encuentra regulada por diversos mecanismos de homeostasis celular. Pero, cuando estas regulaciones desaparecen en los músculos *post mortem*, las ROS tienden a acumularse e interactuar con las proteínas, ácidos grasos y ácidos nucleicos, generando productos secundarios que comprometen la calidad e inocuidad de la carne (Manassis *et al.*, 2020).

La oxidación degrada vitaminas y ácidos grasos esenciales, además de alterar propiedades sensoriales como el color. La mioglobina, presente en las fibras musculares, es responsable del color rojo de la carne. Al oxidarse, la mioglobina se convierte en metamioglobina, lo que produce colores marrones que disminuyen la aceptación del producto (Bellucci et al., 2021). Asimismo, la oxidación de ácidos grasos poliinsaturados genera subproductos como hidroperóxidos y aldehídos, entre ellos el malondialdehído, con efectos citotóxicos, oxidativos y mutagénicos que pueden contribuir a generar enfermedades como artritis reumatoide, aterosclerosis, párkinson, alzheimer y cáncer (Ribeiro et al., 2019; Villasante et al., 2020).

La principal causa de deterioro de la carne es la contaminación microbiana, favorecida por la presencia de nutrientes como ácidos grasos, fosfolípidos, hemoproteínas, minerales y agua. Microorganismos como *Micrococcus*, *Escherichia coli*, entre otros, pueden provocar putrefacción a través de la descarboxilación de aminoácidos y la formación de aminos biogénicas, como la tiramina, putrescina y cadaverina, que pueden reaccionar con nitritos y formar nitrosaminas, moléculas cancerígenas (Carmona-Escutia et al., 2019).

Oxidación lipídica

La oxidación lipídica en la carne es un proceso de degradación que comienza cuando los ácidos grasos, tanto saturados como insaturados, reaccionan con el oxígeno a través de la autooxidación. El

proceso consta de 3 fases: iniciación, propagación y terminación (Figura 3). Durante la iniciación, no ocurre una reacción directa entre el oxígeno y los ácidos grasos insaturados debido a que estos últimos tienen dobles enlaces en forma singlete, mientras que el oxígeno está en forma triplete. Para que la reacción ocurra, el oxígeno debe activarse a un estado electrónico singlete, lo cual se logra mediante la exposición a luz, temperatura y metales de transición que generan radicales libres. Estos radicales atacan a los ácidos grasos, ocasionando la pérdida de hidrógenos y la formación de radicales alquilo y compuestos no radicales como dienos o trienos conjugados (Domínguez et al., 2019).

En la propagación, los radicales alquilo reaccionan con el oxígeno molecular, formando radicales peroxi. Estos, al reaccionar con otros lípidos, generan hidroperóxidos y más radicales alquilo. Los hidroperóxidos se descomponen, produciendo compuestos como pentanal, 4-hidroxinonenal, hexanal y malondialdehído, que alteran las características nutricionales y sensoriales de la carne. Además, estos productos pueden inducir enfermedades inflamatorias, aterosclerosis y algunos tipos de cáncer (Manassis et al., 2020). Finalmente, en la terminación, los radicales libres forman productos estables e inestables que reducen la calidad sensorial de la carne. Este proceso puede ocurrir de dos maneras: a través de la reacción entre radical-radical, formando un aducto no radical, o mediante la acción de antioxidantes, que estabilizan los radicales donando átomos de hidrógeno (Tomović et al., 2017).

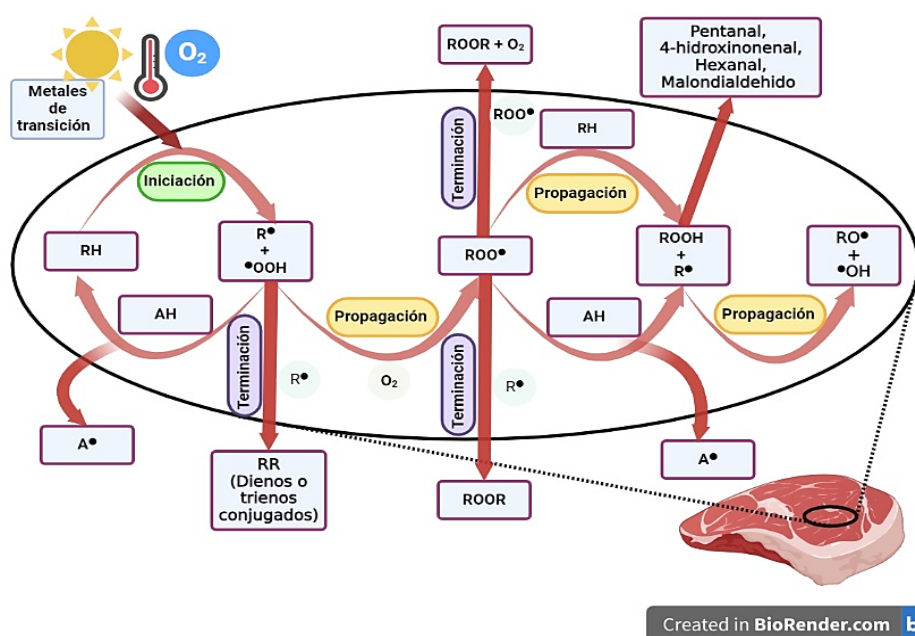


Figura 3. Mecanismo de oxidación de los lípidos en la carne. Elaboración propia con modificaciones de Kumar et al. (2015).

*ROS: especies reactivas de oxígeno; RH: ácidos grasos; R•: radical alquilo; •OOH: radical hidroperoxilo; RR: especies no radicales; ROO•: radical peróxido; ROOR: peróxido orgánico; ROOH: hidroperóxidos; RO•: radical alcoxi; •OH: radical hidroxilo; O2: oxígeno; AH: antioxidante eliminador de radicales libres; A: radical eliminador (relativamente muy estable).

Deterioro microbiano

El deterioro microbiano en la carne y en productos cárnicos es un problema crítico, especialmente en países en desarrollo donde las enfermedades transmitidas por alimentos son una causa significativa de morbilidad y mortalidad. A pesar de que los músculos de animales sanos son estériles, la carne es susceptible a la contaminación debido a su alto contenido de nutrientes, pH adecuado y actividad de agua, lo que favorece el crecimiento microbiano (Pellissery *et al.*, 2020). Durante el sacrificio y desollado, microorganismos pueden contaminar la carne a partir de superficies, equipos, agua, pelo, piel o un manejo inadecuado. Este entorno facilita la proliferación de bacterias como *Enterococcus* sp., *Lactobacillus* sp., *Pseudomonas* sp. y *Enterobacteriaceae*, que deterioran la calidad de la carne al descomponer proteínas y lípidos (Papuc *et al.*, 2017). Además, patógenos como *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* sp., *Escherichia coli* O157:H7 y *Clostridium perfringens* están asociados con brotes de enfermedades transmitidas por carne contaminada (Olaoye, 2011); en los productos cárnicos secos se ha establecido un límite de 6 log UFC/g (Ozaki *et al.*, 2020). Para abordar este desafío, la industria cárnica e investigadores buscan y aplican aditivos antimicrobianos naturales y sintéticos, buscando mejorar la inocuidad y extender la vida útil de productos cárnicos (Villasante *et al.*, 2020).

Antioxidantes utilizados en sistemas cárnicos

La carne y sus derivados ofrecen beneficios para la salud debido a su rica composición química y bioquímica, pero el uso de conservantes sintéticos, como galato de propilo (PG), butilhidroxitolueno (BHT), butilhidroxianisol (BHA), butilhidroxiquinona (TBHQ) y el nitrito de sodio, ha generado preocupaciones debido a sus posibles efectos toxicológicos y cancerígenos (Tomović *et al.*, 2017). Aunque estos conservantes son eficaces en la preservación de productos cárnicos y el nitrito de sodio en la inhibición de patógenos como *Clostridium botulinum*, la industria cárnica ha comenzado a buscar alternativas naturales (Efenberger-Szmechtyk *et al.*, 2021). Se ha reportado que antioxidantes naturales derivados de compuestos fenólicos (ácido gálico, catequina y la quercetina) son efectivos en la prevención de la oxidación y degradación microbiana, además de ofrecer propiedades antiinflamatorias y anticancerígenas (Aminzare *et al.*, 2019).

Antioxidantes y conservantes de origen sintético

En la elaboración de productos cárnicos, antioxidantes y conservantes sintéticos como nitritos, BHT, BHA, y TBHQ son comúnmente utilizados por su capacidad para mantener la vida útil de los alimentos y prevenir

la oxidación, además de garantizar la seguridad frente a patógenos como *Clostridium botulinum* (Flores y Toldrá, 2021). Aunque son efectivos y de bajo costo, su uso está estrictamente regulado por las autoridades legales con base en la concentración máxima permitida. Las regulaciones establecidas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) indican que se permite hasta un 0.01 % de BHA en salchichas frescas y 0.003 % en salchichas deshidratadas (Movileanu *et al.*, 2013). La concentración de BHT en la industria cárnica está limitada al 0.02 %, mientras que la concentración máxima de nitritos en productos cárnicos (triturados, masajeados o bombeados y curados) en Estados Unidos se encuentra entre 156 y 200 ppm. En cambio, en la Unión Europea (UE) y países europeos el nivel máximo de nitritos es de 150 ppm para productos cárnicos enlatados y curados (Lee *et al.*, 2018). Investigaciones previas han vinculado el uso de antioxidantes sintéticos en concentraciones superiores a los límites establecidos con riesgos para la salud, como neoplasias y mutaciones del ADN, entre los cuales las nitrosaminas, formadas a partir de nitritos, son especialmente peligrosas por su potencial teratogénico, mutagénico y cancerígeno (Ribeiro *et al.*, 2019).

La creciente preocupación por los riesgos asociados al uso de conservantes sintéticos ha motivado a los consumidores a reducir su consumo y ha llevado a la industria a buscar alternativas naturales, que no constituyan un riesgo para la salud y que además sean saludables para la conservación de la carne y productos cárnicos (Villasante *et al.*, 2020) (Figura 4).

Compuestos fenólicos como conservantes y antioxidantes de origen natural

El aumento de enfermedades no transmisibles, como la obesidad y el síndrome metabólico, relacionadas con una dieta rica en alimentos procesados y ultraprocesados ha impulsado la búsqueda de alternativas para mitigar estos riesgos. Con investigaciones actuales se ha buscado mantener las ventajas de los productos cárnicos procesados, como su practicidad y vida útil prolongada, pero con un enfoque en reducir los riesgos para la salud mediante la incorporación de moléculas naturales, como los compuestos fenólicos (Villasante *et al.*, 2020). Los compuestos fenólicos, presentes en plantas, son una opción prometedora debido a sus propiedades antioxidantes (por la donación de átomos de hidrógeno y electrones) y son capaces de interrumpir las reacciones de oxidación y estabilizar moléculas oxidantes como el peróxido de hidrógeno, formando agua como subproducto, lo cual mejora la estabilidad y seguridad de los productos cárnicos (Papuc *et al.*, 2017; Efenberger-Szmechtyk *et al.*, 2021).

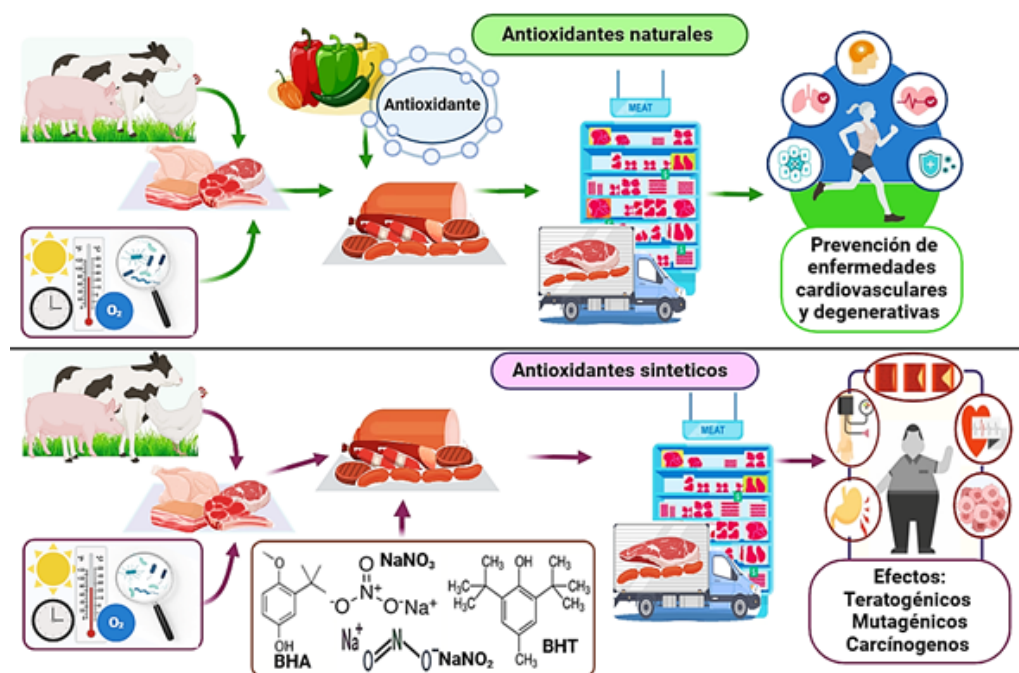


Figura 4. Integración de antioxidantes naturales de *Capsicum* sp. en la conservación de carnes y productos cárnicos en la cadena de producción, en comparación con los conservantes y antioxidantes tradicionales. Elaboración propia con información de (Aminzare et al., 2019; Ribeiro et al., 2019; Villasante et al., 2020; Flores y Toldrá, 2021).

Estos compuestos también tienen efectos antimicrobianos, aunque su mecanismo exacto no se comprende completamente. Sin embargo, se ha reportado que los grupos hidroxilo interactúan con la membrana bacteriana a través de enlaces de hidrógeno, causando cambios en la permeabilidad de la membrana, alteraciones como la pérdida del contenido celular, alteraciones metabólicas y muerte celular (Romero-Luna et al., 2023). Debido a estas propiedades, se investigan para ser ofrecidos como alternativas a los conservantes sintéticos. Se ha reportado que los compuestos fenólicos no solo prolongan la vida útil al reducir la oxidación de lípidos, sino que también mejoran las propiedades sensoriales y microbiológicas (Ribeiro et al., 2019; Ferysiuk et al., 2020).

En este contexto, Papuc et al. (2017) reportaron varios indicadores clave de deterioro de la carne, como el color, dienos conjugados y sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS), entre otros. El método TBARS se considera el más representativo para evaluar la calidad de la carne, ya que mide el malondialdehído (MDA), un producto secundario clave en la oxidación de lípidos (Ozaki et al., 2020). De tal manera, se ha establecido un valor máximo de 2 mg MDA/kg para los productos cárnicos, aunque algunos estudios sugieren que es preferible mantener los valores entre 0.7 y 1.0 mg MDA/kg para evitar la aparición de sabores y olores desagradables (Ghafouri-Oskuei et al., 2020; Kim, 2020). Bellucci et al. (2021) evaluaron el extracto de

pitaya roja y demostraron una reducción significativa en los valores de TBARS en hamburguesas de cerdo, lo que mejoró la aceptación sensorial. Por otro lado, el extracto de *Allium senescens* ha demostrado una actividad antioxidante comparable al BHT en salchichas secas (Qin et al., 2021). Otro estudio destacó que el uso de pulpa de tomate en polvo como antioxidante en salchichas de res no solo redujo la oxidación de lípidos, sino que también mejoró el color y la aceptación sensorial del producto (Ghafouri-Oskuei et al., 2020).

Uso del chile en productos cárnicos

El chile, en sus diversas formas (extracto, polvo u oleoresina), se presenta como una alternativa natural eficaz para sustituir o reducir el uso de antioxidantes sintéticos en la industria cárnica. Esta efectividad podría deberse a los compuestos fenólicos, vitaminas, capsaicinoides y carotenoides presentes, los cuales poseen propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Riquelme y Matiacevich, 2017). Diversas investigaciones han demostrado que ciertas variedades de chile, cuando se utilizan en lugar o en combinación con antioxidantes y conservantes sintéticos, no solo mantienen la estabilidad antioxidante de los productos cárnicos, sino que también mejoran su color y sabor, extienden la vida útil y no provocan alteraciones indeseadas, con lo cual se logra un desempeño similar al de los antioxidantes sintéticos (Ferysiuk et al., 2020; Draszanowska et al., 2021).

Actividad antioxidante de los compuestos fenólicos de chile (*Capsicum* sp.) en la carne

Aunque son limitados, algunos estudios han evaluado los efectos antioxidantes de los compuestos fenólicos presentes en diferentes variedades del chile, con el objetivo de conservar e incluso mejorar la calidad organoléptica de los productos cárnicos (Tabla 2). En particular, Draszanowska *et al.* (2021) investigaron la adición de chile guindilla en polvo al 3 % en carne de cerdo enlatada, pasteurizada y almacenada durante 50 días. Los resultados mostraron que el chile guindilla mejoró la aceptación del producto al reducir el aroma graso y mantener características sensoriales agradables durante el almacenamiento, en comparación con el BHT, que mostró sabores y olores indeseados.

Actividad antimicrobiana de los compuestos fenólicos del chile en la carne

El chile (*Capsicum* sp.), además de su uso alimentario, ha sido valorado en la medicina tradicional por sus propiedades antimicrobianas, atribuibles a compuestos bioactivos como los compuestos fenólicos. Estas moléculas han mostrado eficacia contra bacterias como *Bacillus cereus*, *Salmonella*

typhimurium, *Listeria monocytogenes* y *Staphylococcus aureus* en estudios *in vitro* (Careaga *et al.*, 2003). Por su parte, Villasante *et al.* (2020) confirmaron la actividad antimicrobiana del extracto de chile morrón rojo contra bacterias Gram positivas, como *L. monocytogenes* y *M. luteus*. Cerón-Carrillo *et al.* (2017), también reportaron que extractos de chile serrano y habanero son más efectivos contra *L. monocytogenes* que contra *E. coli*. A pesar de estos hallazgos, el número de estudios que exploran el efecto antimicrobiano de los compuestos fenólicos del chile en sistemas cárnicos es aún limitado (Tabla 3).

Limitaciones y regulaciones legales del uso de los compuestos fenólicos en la carne

El concepto de alimento funcional, originado en Japón en la década de 1980, ha experimentado un crecimiento considerable, especialmente en mercados como Europa y Estados Unidos, donde su valor se estima en \$8 mil millones y \$21.3 mil millones, respectivamente (Butnariu y Sarac, 2019). Aunque no existe una definición única de alimento funcional, en general, se refiere a aquellos alimentos que, además de nutrir, mejoran la salud y reducen el riesgo de enfermedades no transmisibles, siempre y cuando haya evidencia científica que lo respalde (Holdt y Kraan, 2011).

Tabla 2. Productos cárnicos reformulados con compuestos fenólicos de chile

Producto cárnico	Fuente de antioxidantes	Concentración	Efectos principales	Referencia
Salchicha fresca de cerdo	Extracto de chile péndulo.	0.5, 1 y 1.5 %	Los valores TBARS en las salchichas frescas no presentaron diferencias significativas entre tratamientos (0.017 y 0.028 mg MDA/kg) en los primeros 30 días de almacenamiento y posteriormente aumentaron hasta 0.065 mg MDA/kg a los 60 días de almacenamiento a -18 °C.	De Oliveira-Cabral <i>et al.</i> (2020).
Salchicha ahumada de cerdo			En las salchichas ahumadas los tratamientos no presentaron diferencias significativas, con valores entre 0.013 y 0.069 mg MDA/kg durante los 60 días de almacenamiento a -18 °C.	
Carne de cerdo enlatada	Polvo de chile guindilla.	3 %	El polvo de guindilla presentó baja capacidad antioxidante en los lípidos de la carne de cerdo enlatada y almacenada por 50 días a 5 °C, valores TBARS (1.5 y 1.8 mg MDA/kg). Pero, el extracto mejoró la textura, el color y la calidad sensorial.	Draszanowska <i>et al.</i> (2021).
Carne de cerdo enlatado en conserva	Extracto de chile morrón variedad aifos.	0.005, 0.01 y 0.015 %	Los tratamientos con extracto de chile mostraron un efecto reductor de los valores TBARS en la carne almacenada durante 270 días a 4 °C, en comparación con el tratamiento con BHT.	Ferysiuk <i>et al.</i> (2020).
	A todos los tratamientos se les adicionó (NaCl y NaNO ₃).	0.01 % Sales de curado (22 g/kg y 50 mg/kg).	Los valores TBARS para los extractos de chile variaron de 0.46 a 0.64 mg MDA/kg, el BHT se encontró entre 0.44 y 0.74 mg MDA/kg durante el almacenamiento.	
Salchichas de pollo	Extracto de semilla de morrón con polvo de semilla de morrón.	7 y 1 %	El valor TBARS en la salchicha con tratamiento se encontró entre 0.28 y 0.38 mg MDA/kg durante el día 0 hasta el día 14 de almacenamiento a 4 °C. La salchicha control sin tratamiento, presentó valores entre 0.29 y 0.47 mg MDA/kg durante los 14 días de almacenamiento a 4 °C. El tratamiento mejoró las propiedades sensoriales de color, sabor y aceptabilidad.	Kim (2020).
Hamburguesa de res	Extracto de pimienta rojo picante.	0.35 %	El extracto de chile mantuvo niveles de TBARS por debajo de 0.633 mg MDA/kg durante los 12 días de almacenamiento a 4 °C. En cuanto al análisis sensorial, mostró una disminución en la aceptabilidad debido a alteraciones del sabor.	Villasante <i>et al.</i> (2020).

*TBARS: sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico; MDA: malondialdehído; mg: miligramos; kg: kilogramos; °C: grados Celsius; BHT: butilhidroxitolueno.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Actividad antimicrobiana *in situ* de compuestos fenólicos del chile en productos cárnicos

Carne/ Producto cárnico procesado	Tratamiento	Microorganismos evaluados	Resultados	Referencias
Carne de res cruda en trozos	Extracto de pimienta morrón entero con semillas. Para <i>S. typhimurium</i> de 0.02 a 2.5 mL/100 g de carne. Para <i>P. aeruginosa</i> de 0.02 a 5 mL/100 g de carne.	<i>S. typhimurium</i> (ATCC 14028) y <i>P. aeruginosa</i> (ATCC 27853).	Concentraciones de extracto de 1.5 y 2.5 mL/100 g de carne inactivaron <i>S. typhimurium</i> y su concentración mínima letal fue de 1.5 mL/100 g de carne. En el caso de <i>P. aeruginosa</i> informaron que concentraciones del extracto de 4 y 5 mL/100 g de carne es efectiva después de los 3 días de almacenamiento, pero concentraciones de 3 mL/100 g de carne las inhibe después de los 5 días. La concentración mínima letal fue 3 mL/100 g de carne.	Careaga et al. (2003).
Chorizo de cerdo madurado en seco	Polvo de pimentón de 22 g/kg de carne.	BMA y bacterias coliformes.	Las BMA aumentaron durante el almacenamiento hasta el día 19 y comenzaron a disminuir. Los coliformes al día 0 de almacenamiento fueron de 4.1 log UFC/g y al final del almacenamiento de 33 días fue de 1.6 log UFC/g.	Carmona-Escutia et al. (2019).
Salchicha fresca de cerdo	Extracto de chile péndulo (0.5, 1 y 1.5 %).	Coliformes, <i>Staphylococcus</i> coagulasa positivo, <i>Salmonella</i> sp. y <i>Clostridium</i> .	Muestras tratadas con distintas concentraciones del extracto mostraron valores menores a 3.0 NMP para coliformes, mientras que el resto de las bacterias no se presentaron.	Cabral et al. (2021).
Salchicha de pollo	Extracto a base de aceite de oliva con semilla de morrón (1:5 p/p).	BMA	No se detectaron bacterias durante los 14 días de almacenamiento.	Kim (2020).
Hamburguesa de res	Extracto de pimienta rojo picante (0.35 %).	BMA	A los 6 días de almacenamiento se encontraron entre 6 y 7 log UFC/g.	Villasante et al. (2020).

*ATCC: American Type Culture Collection; S: *Salmonella*; P: *Pseudomonas*; BMA: bacterias mesófilas aerobias; mL: mililitros; g: gramos; log: logaritmo; UFC: unidad formadora de colonias; NMP: número más probable.

Fuente: elaboración propia.

La aplicación de extractos de plantas en la medicina tradicional ha impulsado la investigación de compuestos bioactivos y su interacción con alimentos, con el fin de garantizar su seguridad a través de estudios *in vitro* e *in vivo*. En particular, los compuestos fenólicos, como la epigallocatequina, quercetina y antocianinas, han demostrado potencial para disminuir la incidencia de enfermedades cardiovasculares, diabetes, obesidad e incluso distintos tipos de cáncer (Konstantinidi y Koutelidakis, 2019). No obstante, para su uso comercial en alimentos, es esencial que sus propiedades funcionales se demuestren mediante ensayos clínicos controlados y aleatorios, además de asegurar su seguridad mediante estudios toxicológicos. Cumplir con las normativas de seguridad alimentaria es crucial, con regulaciones específicas en lugares como la Unión Europea, bajo la supervisión de la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA), y en Estados Unidos, a través de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) (Granato et al., 2020).

Actualmente existen regulaciones estrictas sobre el uso de aditivos y extractos en alimentos, incluidos los productos cárnicos. En la Unión Europea, los Reglamentos (UE) n. 1333/2008 y n. 1129/2011 establecen límites para el uso de extractos como el de pimentón (E 160c), con un límite de 10 mg/kg solo en embutidos, patés y terrines, mientras que el extracto de romero (E 392) tiene como límite 100 mg/kg solo en embutidos secos, 15 mg/kg en carne con un contenido graso no superior al 10 %, 150 mg/kg en

carne con un contenido superior al 10 % de materia grasa y 150 mg/kg en carne deshidratada (EUR-Lex, 2008; EUR-Lex, 2011).

Por otra parte, la FDA (2020), a través del título 21 de regulaciones federales en el subcapítulo B de alimentos para el consumo humano, informa que las especias, condimentos, aromatizantes naturales, extractos naturales (sin solventes), aceites esenciales, oleorresinas (sin solventes), entre los que se incluyen *C. frutescens* L., y *C. annuum* L., pueden considerarse sustancias generalmente reconocidas como seguras (GRAS). Sin embargo, existen limitaciones sobre su uso en productos cárnicos debido a que pueden ocasionar alteraciones indeseadas en las propiedades organolépticas, especialmente en casos de ingredientes con sabores y olores fuertes, como el clavo, pimienta negra y otros condimentos.

Referencias

- Abhari, K. y Khaneghah, A. M. (2020). Alternative extraction techniques to obtain, isolate and purify proteins and bioactive from aquaculture and by-products. *Advances in Food and Nutrition Research*, 92, 35-52. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2019.12.004>
- Alara, O. R.; Abdurahman, N. H. y Ukaegbu, C. I. (2021). Extraction of phenolic compounds: A review. *Current Research in Food Science*, 4, 200-214. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2021.03.011>
- Alirezalu, K.; Hesari, J.; Yaghoubi, M.; Khaneghah, A. M.; Alirezalu, A.; Pateiro, M. y Lorenzo, J. M. (2021). Combined

- effects of ϵ -polylysine and ϵ -polylysine nanoparticles with plant extracts on the shelf life and quality characteristics of nitrite-free frankfurter-type sausages. *Meat Science*, 172, 108318. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108318>
- Al Jitan, S.; Alkhoori, S. A. y Yousef, L. F. (2018). Phenolic acids from plants: Extraction and application to human health. *Studies in Natural Products Chemistry*, 58, 389-417. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64056-7.00013-1>
- Al Khalaf, A.; Issa, R. y Khattabi, A. (2020). Content of vitamin c, phenols and carotenoids extracted from *Capsicum annuum* with antioxidant, antimicrobial and coloring effects. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 23(9), 1154-1161. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2020.1154.1161>
- Aminzare, M.; Hashemi, M.; Ansarian, E.; Bimakr, M.; Azar, H.; Mehrasbi, M. R.; Daneshamooz, S.; Raeisi, M.; Jannat, B. y Afshari, A. (2019). Using natural antioxidants in meat and meat products as preservatives: A review. *Advances in Animal and Veterinary Sciences*, 7(5), 417-426. <http://dx.doi.org/10.17582/journal.aavs/2019/7.5.417.426>
- Antonious, G. F. (2018). Capsaicinoids and vitamins in hot pepper and their role in disease therapy. *InTech*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78243>
- Assis, M. L. D.; Gomes, M. A. G. B.; Da Cruz, L. L.; Passos, M. d. S.; Pereira, S. M.; Arantes, M.; Oliveira, D. B. y Vieira, I. J. C. (2019). Determination of antioxidant potential and quantitation of phenolic compounds by HPLC in accession of *Capsicum baccatum* var. *pendulum*. *Química Nova*, 42(1), 17-21. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170294>
- Azmir, J.; Zaidul, I. S. M.; Rahman, M. M.; Sharif, K. M.; Mohamed, A.; Sahena, F.; Jahurul, M. H. A.; Ghafoor, K.; Norulini, N. A. N. y Omar, A. K. M. (2013). Techniques for extraction of bioactive compounds from plant materials: A review. *Journal of Food Engineering*, 117(4), 426-436. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.01.014>
- Blanco-Ríos, A. K.; Medina-Juárez, L. Á.; González-Aguilar, G. A. y Gámez-Meza, N. (2013). Antioxidant activity of the phenolic and oily fractions of different sweet bell peppers. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 57(2), 137-143. <https://doi.org/10.29356/jmcs.v57i2.226>
- Bellucci, E. R. B.; Munekata, P. E.; Pateiro, M.; Lorenzo, J. M. y Da Silva Barretto, A. C. (2021). Red pitaya extract as natural antioxidant in pork patties with total replacement of animal fat. *Meat Science*, 171, 108284. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108284>
- Boler, D. D. y Woerner D. R. (2017). What is meat? A perspective from the American Meat Science Association. *Animal Frontiers*, 7(4), 8-11. <https://doi.org/10.2527/af.2017.0436>
- Butnariu, M. y Sarac I. (2019). Functional Food. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 3(3), 7-16. <https://doi.org/10.14302/issn.2379-7835.ijn-19-2615>
- Cabral, N. O.; Oliveira, R. F.; Henry, F. C.; Oliveira, D. B.; Santos Junior, A. C.; Maia Junior, J. A. y Martins, M. L. L. (2021). Effect of the fruit aqueous extract of balloon pepper (*Capsicum baccatum* var. *Pendulum*) on lipid oxidation, microbiological quality and consumer acceptance of fresh pork sausage and smoked. *Food Science and Technology*, 42, 1-8. <https://doi.org/10.1590/fst.09221>
- Careaga, M.; Fernández, E.; Dorantes, L.; Mota, L.; Jaramillo, M. E. y Hernández-Sánchez, H. (2003). Antibacterial activity of *Capsicum* extract against *Salmonella typhimurium* and *Pseudomonas aeruginosa* inoculated in raw beef meat. *International Journal of Food Microbiology*, 83(3), 331-335. [https://doi.org/10.1016/s0168-1605\(02\)00382-3](https://doi.org/10.1016/s0168-1605(02)00382-3)
- Carmona-Escutia, R. P.; Urías-Silvas, J. E.; García-Parra, M. D.; Ponce-Alquicira, E.; Villanueva-Rodríguez, S. J. y Escalona-Buendia, H. B. (2019). Influence of paprika (*Capsicum annuum* L.) on quality parameters and biogenic amines production of a ripened meat product (chorizo). *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(3), 949-966. <https://doi.org/10.24275/uam/izt/dcbi/revmexingquim/2019v18n3/carmona>
- Cerón-Carrillo, T. G.; Santiesteban-López, N. A. y Acle-Mena, R. S. (2017). Composition and antimicrobial activity of two *Capsicum* extracts. *CIBA Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 5(10), 87-107. <https://doi.org/10.23913/ciba.v5i10.63>
- Chávez-Mendoza, C.; Sánchez, E.; Muñoz-Márquez, E.; Sida-Arreola, J. P. y Flores-Cordova, M. A. (2015). Bioactive compounds and antioxidant activity in different grafted varieties of bell pepper. *Antioxidants*, 4(2), 427-446. <https://doi.org/10.3390/antiox4020427>
- Chel-Guerrero, L. D.; Oney-Montalvo, J. E. y Rodríguez-Buenfil, I. M. (2021). Phytochemical characterization of by-products of habanero pepper grown in two different types of soils from Yucatán, México. *Plants*, 10(4), 779. <https://doi.org/10.3390/plants10040779>
- Çinar, I. (2005). Effects of cellulase and pectinase concentrations on the colour yield of enzyme extracted plant carotenoids. *Process Biochemistry*, 40(2), 945-949. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.02.022>
- Cosme, P.; Rodríguez, A. B.; Espino, J. y Garrido, M. (2020). Plant phenolics: Bioavailability as a key determinant of their potential health-promoting applications. *Antioxidants*, 9(12), 1263. <https://doi.org/10.3390/antiox9121263>
- Cutrim, C. S. y Cortez, M. A. S. (2018). A review on polyphenols: Classification, beneficial effects and their application in dairy products. *International Journal of Dairy Technology*, 71(3), 564-578. <https://doi.org/10.1111/1471-0307.12515>
- Das, A. K.; Islam, M. N.; Faruk, M. O.; Ashaduzzaman, M. y Dungani, R. (2020). Review on tannins: Extraction processes, applications and possibilities. *South African Journal of Botany*, 135, 58-70. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2020.08.008>
- De Aguiar, A. C.; Da Fonseca Machado, A. P.; Angolini, C. F. F.; De Moraes, D. R.; Baseggio, A. M.; Eberlin, M. N.; Maróstica, M. R. J. y Martínez, J. (2019). Sequential high-pressure extraction to obtain capsinoids and phenolic compounds from biquinho pepper (*Capsicum chinense*). *The Journal of Supercritical Fluids*, 150, 112-121. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2019.04.016>
- De Oliveira-Cabral, N.; De Oliveira, R. F.; Henry, F. D. C.; De Oliveira, D. B.; Dos Santos, A. C.; De azevedo-Maia, J. y Martins, M. L. L. (2020). Effect of the extract of balloon pepper (*Capsicum baccatum* var. *Pendulum*) on lipid peroxidation and microbiology of pork sausage. *Agricultural Research & Technology*, 24(5), 165-167. <https://doi.org/10.19080/artoaj.2020.24.556283>
- Dias, A. L. B.; Sergio, C. S. A.; Santos, P.; Barbero, G. F.; Rezende, C. A. y Martínez, J. (2016). Effect of ultrasound on the supercritical CO₂ extraction of bioactive compounds from dedo de moça pepper (*Capsicum baccatum* L. var. *pendulum*). *Ultrasonics Sonochemistry*, 31, 284-294. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.01.013>
- Dinu, M.; Soare, R.; Hoza, G. y Băbeanu, C. (2018). Changes in phytochemical and antioxidant activity of hot pepper fruits on maturity stages, cultivation areas and genotype. *South Western Journal of Horticulture, Biology and Environment*, 9(2), 65-76. https://biozoojournals.ro/swjhbe/v9n2/02_swjhbe_v9n2_Dinu.pdf

- Domínguez, R.; Pateiro, M.; Gagaoua, M.; Barba, F. J.; Zhang, W. y Lorenzo, J. M. (2019). A comprehensive review on lipid oxidation in meat and meat products. *Antioxidants*, 8(10), 429. <https://doi.org/10.3390/antiox8100429>
- Draszanowska, A.; Karpińska T. M. y Olszewska, M. A. (2021). The effect of the addition of chilli pepper fruits and refrigerated storage time on the quality of pasteurised canned meat. *Czech Journal of Food Sciences*, 38(5), 301-307. <https://doi.org/10.17221/52/2020-cjfs>
- Echave, J.; Pereira, A. G.; Carpena, M.; Prieto, M. Á. y Simal-Gandara, J. (2020). Capsicum seeds as a source of bioactive compounds: Biological properties, extraction systems, and industrial application. In *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91785>
- Efenberger-Szmechtyk M.; Nowak, A. y Czyzowska, A. (2021). Plant extracts rich in polyphenols: Antibacterial agents and natural preservatives for meat and meat products. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(1), 149-178. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1722060>
- EUR-Lex. (2008). Reglamento (CE) n. 1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2008 sobre aditivos alimentarios. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008R1333-20170612&from=HU>
- EUR-Lex. (2011). Reglamento (UE) n. 1129/2011 de la Comisión de 11 de noviembre de 2011 por el que se modifica el anexo II del Reglamento (CE) no 1333/2008 del Parlamento Europeo y del Consejo para establecer una lista de aditivos alimentarios de la Unión. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2011/1129/oj?locale=es>
- Farahmandfar, R.; Asnaashari, M. y Sayyad, R. (2017). Antioxidant activity and total phenolic content of *Capsicum frutescens* extracted by supercritical CO₂, ultrasound and traditional solvent extraction methods. *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 20(1), 196-204. <https://doi.org/10.1080/0972060x.2017.1280420>
- Farahmandfar, R.; Kenari, R. E.; Asnaashari, M.; Shahrampour, D. y Bakhshandeh, T. (2019). Bioactive compounds, antioxidant and antimicrobial activities of *Arum maculatum* leaves extracts as affected by various solvents and extraction methods. *Food Science & Nutrition*, 7(2), 465-475. <https://doi.org/10.1002/fsn3.815>
- FDA. (2020). Food for human consumption. Part 182: substances generally recognized as safe. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/CFRSearch.cfm?fr=182.10>
- Ferysiuk, K.; Wójciak, K. M.; Materska, M.; Chilczuk, B. y Pabich, M. (2020). Modification of lipid oxidation and antioxidant capacity in canned refrigerated pork with a nitrite content reduced by half and addition of sweet pepper extract. *LWT- Food Science and Technology*, 118, 108738. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108738>
- Flores, M. y Toldrá, F. (2021). Chemistry, safety, and regulatory considerations in the use of nitrite and nitrate from natural origin in meat products-Invited review. *Meat Science*, 171, 108272. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108272>
- Ghafari-Oskuei H.; Javadi, A.; Asl, M. R. S.; Azadmard D. S. y Armin, M. (2020). Quality properties of sausage incorporated with flaxseed and tomato powders. *Meat Science*, 161, 107957. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2019.107957>
- Granato, D.; Barba, F. J.; Bursać Kovačević, D.; Lorenzo, J. M.; Cruz, A. G. y Putnik, P. (2020). Functional foods: Product development, technological trends, efficacy testing, and safety. *Annual Review of Food Science and Technology*, 11(1), 93-118. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-032519-051708>
- Hamed, M.; Kalita, D.; Bartolo, M. E. y Jayanty, S. S. (2019). Capsaicinoids, polyphenols and antioxidant activities of *Capsicum annum*: Comparative study of the effect of ripening stage and cooking methods. *Antioxidants*, 8(9), 364. <https://doi.org/10.3390/antiox8090364>
- Hernández-Pérez, T.; Gómez-García, M. D. R.; Valverde, M. E. y Paredes-López, O. (2020). *Capsicum annum* (hot pepper): An ancient Latin-American crop with outstanding bioactive compounds and nutraceutical potential. A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(6), 2972-2993. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12634>
- Holdt, S. L. y Kraan, S. (2011). Bioactive compounds in seaweed: Functional food applications and legislation. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), 543-597. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9632-5>
- IARC. Red Meat and Processed Meat volume 114. Lyon, France: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. 2018. ISBN 978-92-832-0180-9. Available from: <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Red-Meat-And-Processed-Meat-2018>
- Jiménez-García, S. N.; García-Mier, L.; Ramírez-Gómez, X. S.; Guevara-González, R. G.; Aguirre-Becerra, H.; Escobar-Ortiz, A.; Contreras-Medina, L. M.; García-Trejo, J. F.; Vázquez-Cruz, M. A. y Feregrino-Pérez, A. A. (2023). Characterization of the key compounds of bell pepper by spectrophotometry and gas chromatography on the effects of induced stress on the concentration of secondary metabolite. *Molecules*, 28(9), 3830. <https://doi.org/10.3390/molecules28093830>
- Kalogianni, A. I.; Lazou, T.; Bossis, I. y Gelasakis, A. I. (2020). Natural phenolic compounds for the control of oxidation, bacterial spoilage, and foodborne pathogens in meat. *Foods*, 9(6), 794. <https://doi.org/10.3390/foods9060794>
- Kaur, C. y Kapoor, H. C. (2001). Antioxidants in fruits and vegetables—the millennium's health. *International Journal of Food Science & Technology*, 36(7), 703-725. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.00513.x>
- Kim, Y. K. (2020). Quality improvement of the chicken sausage with pepper seed (*Capsicum annum* L.). *Current Research in Nutrition and Food Science Journal*, 8(3), 829-836. <https://doi.org/10.12944/crnfsj.8.3.14>
- Konstantinidi, M. y Koutelidakis, A. (2019). Functional foods and bioactive compounds: A review of its possible role on weight management and obesity's metabolic consequences. *Medicines*, 6(3), 94. <https://doi.org/10.3390/medicines6030094>
- Kumar, Y.; Yadav, D. N.; Ahmad, T. y Narsaiah, K. (2015). Recent trends in the use of natural antioxidants for meat and meat products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 14(6), 796-812. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12156>
- Lee, S.; Lee, H.; Kim, S.; Lee, J.; Ha, J.; Choi, Y.; Oh, H.; Choi, K. H. y Yoon, Y. (2018). Microbiological safety of processed meat products formulated with low nitrite concentration. A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(8), 1073-1077. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0675>
- Manassis, G.; Kalogianni, A. I.; Lazou, T.; Moschovas, M.; Bossis, I. y Gelasakis, A. I. (2020). Plant-derived natural antioxidants in meat and meat products. *Antioxidants*, 9(12), 1215. <https://doi.org/10.3390/antiox9121215>
- Mohd, H. N.; Yusof, N. A.; Yahaya, A. F.; Mohd Rozali, N. N. y Othman, R. (2019). Carotenoids of *Capsicum* fruits: Pigment profile and health-promoting functional attributes. *Antioxidants*, 8(10), 469. <https://doi.org/10.3390/antiox8100469>

- Movileanu, I.; De González, M. T. N.; Hafley, B.; Miller, R. K. y Keeton, J. T. (2013). Comparison of dried plum puree, rosemary extract, and BHA/BHT as antioxidants in irradiated ground beef patties. *International Journal of Food Science*, 2013, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2013/360732>
- Olaoye, O. A. (2011). Meat: An overview of its composition, biochemical changes and associated microbial agents. *International Food Research Journal*, 18(3), 847-855. <https://www.researchgate.net/publication/277018609>
- Olatunji, T. L. y Afolayan, A. J. (2019). Comparative quantitative study on phytochemical contents and antioxidant activities of *Capsicum annum* L. and *Capsicum frutescens* L. *The Scientific World Journal*, 2019(1), 4705140. <https://doi.org/10.1155/2019/4705140>
- Ozaki, M. M.; Munekata, P. E. S.; Lopes, A. S.; Nascimento, M. D. S. D., Pateiro, M.; Lorenzo, J. M. y Pollonio, M. A. R. (2020). Using chitosan and radish powder to improve stability of fermented cooked sausages. *Meat Science*, 167, 108165. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108165>
- Ozaki, M. M.; Munekata, P. E.; Jacinto-Valderrama, R. A.; Efraim, P.; Pateiro, M.; Lorenzo, J. M. y Pollonio, M. A. R. (2021). Beetroot and radish powders as natural nitrite source for fermented dry sausages. *Meat Science*, 171, 108275. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108275>
- Panche, A. N.; Diwan, A. D. y Chandra, S. R. (2016). Flavonoids: An overview. *Journal of Nutritional Science*, 5, e47. <https://doi.org/10.1017/jns.2016.41>
- Papuc, C.; Goran, G. V.; Predescu, C. N.; Nicorescu, V. y Stefan, G. (2017). Plant polyphenols as antioxidant and antibacterial agents for shelf-life extension of meat and meat products: Classification, structures, sources, and action Mechanisms. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16(6), 1243-1268. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12298>
- Pellissery, A. J.; Vinayamohan, P. G.; Amalaradjou, M. A. R. y Venkitanarayanan, K. (2020). Chapter 17. Spoilage bacteria and meat quality. En Ashim Kumar Biswas y Prabhat Kumar Mandal (Eds.), *Meat Quality Analysis* (pp. 307-334). Connecticut: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819233-7.00017-3>
- Qin, L.; Yu, J.; Zhu, J.; Kong, B. y Chen, Q. (2021). Ultrasonic-assisted extraction of polyphenol from the seeds of *Allium senescens* L. and its antioxidative role in Harbin dry sausage. *Meat Science*, 172, 108351. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108351>
- Ribeiro, J. S.; Santos, M. J. M. C.; Silva, L. K. R.; Pereira, L. C. L.; Santos, I. A.; da Silva Lannes, S. C. y Da Silva, M. V. (2019). Natural antioxidants used in meat products: A brief review. *Meat Science*, 148, 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.10.016>
- Riquelme, N. y Matiacevich, S. (2017). Characterization and evaluation of some properties of oleoresin from *Capsicum annum* var. cacho de cabra. *CyTA-Journal of Food*, 15(3), 344-351. <https://doi.org/10.1080/19476337.2016.1256913>
- Romero-Luna, H. E.; Colina, J.; Guzmán-Rodríguez, L.; Sierra-Carmona, C. G.; Fariás-Campomanes, Á. M.; García-Pinilla, S.; González-Tijera, M. M.; Malagón-Alvira, K. O. y Peredo-Lovillo, A. (2023). *Capsicum* fruits as functional ingredients with antimicrobial activity: An emphasis on mechanisms of action. *Journal of Food Science and Technology*, 60, 2725-2735. <https://doi.org/10.1007/s13197-022-05578-y>
- Sandoval-Castro, C. J.; Valdez-Morales, M.; Oomah, B. D.; Gutiérrez-Dorado, R.; Medina-Godoy, S. y Espinosa-Alonso, L. G. (2017). Bioactive compounds and antioxidant activity in scalded Jalapeño pepper industrial byproduct (*Capsicum annum*). *Journal of Food Science and Technology*, 54, 1999-2010. <https://doi.org/10.1007/s13197-017-2636-2>
- Sowbhagya, H. B. (2019). Value-added processing of by-products from spice industry. *Food Quality and Safety*, 3(2), 73-80. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy029>
- Tanase, C.; Coșarcă, S. y Muntean, D. L. (2019). A critical review of phenolic compounds extracted from the bark of woody vascular plants and their potential biological activity. *Molecules*, 24(6), 1182. <https://doi.org/10.3390/molecules24061182>
- Tomović, V.; Jokanović, M.; Šojić, B.; Škaljac, S. y Ivić, M. (2017). Plants as natural antioxidants for meat products. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 85(1), 1-9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/85/1/012030>
- Villasante, J.; Ouerfelli, M.; Bobet, A.; Metón, I. y Almajano, M. P. (2020). The effects of pecan shell, roselle flower and red pepper on the quality of beef patties during chilled storage. *Foods*, 9(11), 1692. <https://doi.org/10.3390/foods9111692>
- Vuolo, M. M.; Lima, V. S. y Junior, M. R. M. (2019). Chapter 2. Phenolic compounds: Structure, classification, and antioxidant power. Maira Rubi Segura Campos (Ed.), *Bioactive compounds* (pp. 33-50). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814774-0.00002-5>

Nuevos registros de Pucciniales (Fungi) y de hospedantes parasitados por royas sobre la familia Poaceae en Colombia

New records of Pucciniales (Fungi) and hosts parasitized by rusts on the Poaceae family in Colombia

Sara Aguirre-Manco ^{1,2}, Mauricio Salazar-Yepes ^{1,3}.

¹Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. Medellín, Colombia. ²  saraguirreman@unal.edu.co; ³  masalazay@unal.edu.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.116993>

2024 | 73-1 p 40-48 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-10-10 Acep.: 2025-02-25

Resumen

Conocer la funga de Pucciniales que parasitan plantas nativas de Colombia, e introducidas, se hace necesario por la importancia biológica y económica que estos representan. De los hongos pertenecientes a este Orden, se estima que solo el 18 % de las royas que están presentes en el territorio nacional han sido registradas. El objetivo de esta investigación fue el estudio de nuevos registros de royas y de hospedantes parasitados dentro de la familia Poaceae en Colombia. Se estudiaron muestras depositadas en el Museo Micológico de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín (MMUNM) y se describieron las características morfológicas mediante microscopía óptica convencional. Se registran para Colombia cuatro especies de royas pertenecientes a las familias Pucciniaceae y Pucciniastraceae (*Puccinia digna*, *Pucciniastrum circaeae*, *Uredo chrysophyllicola* y *Uromyces sporobollicola*), recolectadas sobre las familias botánicas Onagraceae, Poaceae y Sapotaceae en los departamentos de Chocó, Cundinamarca, Nariño, Putumayo y Santander. Se reportan 16 nuevos hospederos parasitados por royas previamente reportadas en el país sobre la familia Poaceae, recolectados en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Caldas, Caquetá, Cundinamarca, Magdalena, Santander y Valle del Cauca. Los nuevos registros enriquecen el conocimiento de la funga de Pucciniales de Colombia, y proporcionan información sobre este grupo de hongos en lugares que aún no presentan suficientes registros. Además, se actualiza el rango de hospedantes de royas con potencial fitopatogénico en cultivos de interés comercial.

Palabras clave: biodiversidad, fitopatógenos, funga, Pucciniaceae, Pucciniastraceae.

Abstract

The knowledge of rust fungi that parasitize native and introduced plants in Colombia is important due to their biological and economic implications, considering that only 18 % of the rusts estimated to be present in this country have been recorded. The objective of this research was to study new records of rusts and parasitized hosts within the Poaceae family in Colombia. Samples deposited in the Museo Micológico de la Universidad Nacional de Colombia (MMUNM) were studied, and conducting morphological descriptions were conducted using conventional optical microscopy. Four species of Pucciniales belonging to the families Pucciniaceae and Pucciniastraceae have been recorded for Colombia (*Puccinia digna*, *Pucciniastrum circaeae*, *Uredo chrysophyllicola* and *Uromyces sporobollicola*), collected on the botanical families Onagraceae, Poaceae and Sapotaceae in the departments of Chocó, Cundinamarca, Nariño, Putumayo, and Santander. We report 16 new hosts parasitized by rusts previously reported in the country on the Poaceae family, collected in the departments of Antioquia, Boyacá, Caldas, Caquetá, Cundinamarca, Magdalena, Santander, and Valle del Cauca. The new records enrich the Pucciniales funga of Colombia, providing information on this group of fungi in places that still do not have enough records, while also updating the host range of rusts with phytopathogenic potential in crops of commercial interest.

Keywords: Biodiversity, funga, Phytopathogens, Pucciniaceae, Pucciniastraceae.

Introducción

La biodiversidad de Colombia ha sido destacada en cuanto a la cantidad de aves, insectos, mamíferos, reptiles y plantas registradas en el país. Para el caso de la funga se reportaron 7223 especies de hongos distribuidos en los reinos Chromista, Fungi y Protozoa, lo cual solo representa un poco más del 2 % de las 300 000 especies que se estima que están presentes en el territorio (Cossu *et al.*, 2022). La funga de Pucciniales alberga 67 géneros (58 teleomorfos y 9 anamorfos), los cuales agrupan 493 especies de royas encontradas en especies vegetales nativas e introducidas, pertenecientes a 88 familias botánicas de plantas vasculares y helechos. De las royas reportadas en Colombia, aproximadamente el 26 % (130 especies) tienen sus hospedantes clasificados dentro de la familia Poaceae, siendo esta la segunda mayor familia botánica parasitada, en la cual se encuentran especies vegetales de interés económico para el país como la cebada (*Hordeum vulgare* L.) y el trigo (*Triticum* sp.); y también en algunas especies consideradas como arvenses (Salazar-Yepes y Piepenbring, 2022). Por su parte, dentro de las familias Onagraceae y Sapotaceae se registran en el país las especies *Aecidium fuchsia* H. S. Jackson y *Puccinia lucumae* Kern, Thruston y Whetzel, respectivamente (Buriticá *et al.*, 2014).

Así, el objetivo de esta investigación fue el estudio de nuevos registros de royas y de hospedantes parasitados dentro de la familia Poaceae en Colombia.

Materiales y métodos

Material examinado

Los hospedantes parasitados por royas fueron recolectados en 11 departamentos de Colombia (Antioquia, Boyacá, Caldas, Caquetá, Chocó, Cundinamarca, Magdalena, Nariño, Putumayo, Santander y Valle del Cauca), y se conservaron en el Museo Micológico de la Universidad Nacional de Colombia (MMUNM) sin ser identificados. La identificación de los ejemplares botánicos fue realizada en el herbario Gabriel Gutiérrez Villegas (Medel) de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, y las royas en el Laboratorio de Micología del MMUNM.

Descripción morfológica de royas

Se siguió la metodología propuesta por Álvarez-Morales *et al.* (2022). Así, se revisaron los ejemplares con la ayuda de un estereomicroscopio Carl Zeiss Stemi 305, con el fin de encontrar los estados esporicos de la roya y realizar micropreparados en lactoglicerina a partir de raspados y cortes de los soros presentes en el material vegetal, los cuales fueron visualizados con la ayuda de un microscopio

óptico de luz Carl Zeiss Axio Lab.A1, donde se midió el tamaño y se observaron los caracteres morfológicos de las estructuras encontradas (30 mediciones por estructura). Para la toma y procesamiento de microfotografías se utilizó una cámara digital AxioCam ERc5s y el software ZEN 2.5, respectivamente. La información obtenida de las royas fue comparada con literatura especializada en Pucciniales para la identificación de las especies y los nuevos hospedantes parasitados.

Resultados

Nuevos registros de Pucciniales para Colombia

A continuación, se presentan los registros en orden alfabético mediante un listado que incluye basionimos y sinónimos asociados, descripción de los estados esporicos encontrados, ciclo de vida, distribución geográfica y comentarios adicionales.

1. *Puccinia digna* Arthur y Holway, Proc. Am. phil. Soc. 64: 198. 1925. (Figura 1a-d). Uredinio con soros anfigenos, predominantemente hipófilos, pulvinados, de color amarillo-dorados; paráfisis capitadas, de 37-73 x 12-18 μ m; pared de 2.5-5 μ m de grosor uniforme, de color hialina; uredosporas globosas, 17-25 x 17-20 μ m; pared equinulada, menor a 2.5 μ m de grosor uniforme, de color amarillo-dorada pálida; poros germinativos de seis a ocho dispersos.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Argentina, Bolivia, Chile, Ecuador, México (Cummins, 1971) y en Colombia nuevo registro.

Material estudiado: *Nassella mucronata* (Kunth) R.W. Pohl. (Poaceae): Cundinamarca, Cajicá, vía al cerro, 2800 m s.n.m., 31 de agosto de 2010, Víctor Manuel Pardo-Cardona, MMUNM-3955.

Comentarios: Espermogonio, Ecio y Telio no se encontraron en el material estudiado; según Cummins (1971): telio epífilo, de color marrón oscuro, compacto, pulvinado; teliosporas elipsoides, de color marrón; pared lisa, de 6-13 μ m de grosor apical; pedicelo persistente, de color hialino a amarillo-dorado, de 130 μ m de longitud. Los estados espermogonio y ecio no han sido registrados para esta especie.

2. *Pucciniastrum circaeae* (Thüm.) Speg., Decades mycologicae Italicae Dec. I-XII (n. 1-120): no. 65. 1879. (Figura 1e-i).

= *Uredo circaeae* Alb. y Schwein., Consp. fung.: 124. 1805.

= *Erysibe pustulata* (Pers.) Wallr. y *circaeae* Wallr. [as "(Alb. y Schwein.) Wallr."], Fl. Crypt. Germ. 2: 198. 1833.

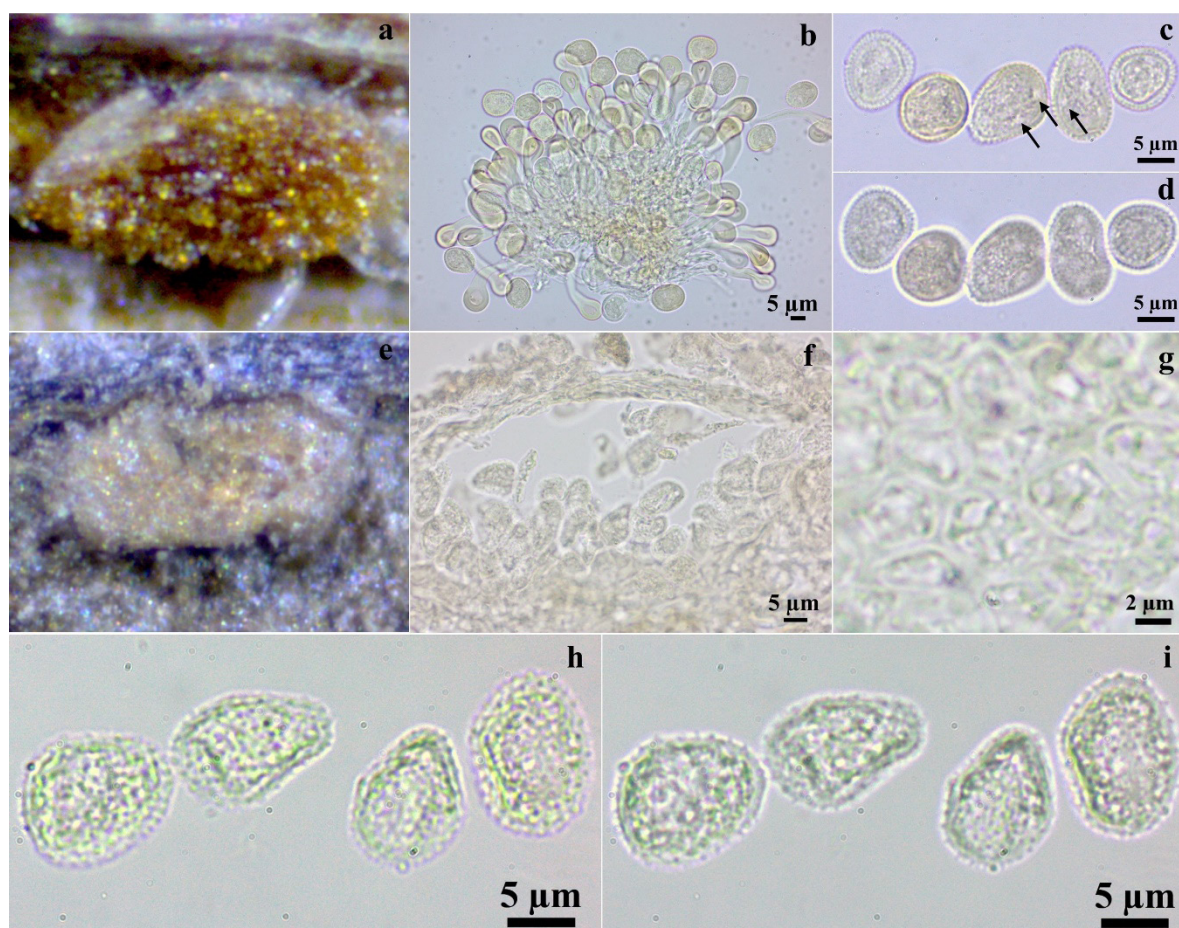


Figura 1. a-d. *Puccinia digna*. a. Uredosoro. b. Paráfisis. c-d. Uredosporas. c. En vista mediana con poros dispersos (flechas). d. En vista superficial. **e-i. *Pucciniastrum circaeae*.** e. Uredosoro. f. Sección transversal del uredosoro. g. Células peridiales. h-i. Uredosporas. h. En vista mediana. i. En vista superficial.

= *Melampsora circaeae* Thüm. [as “(Alb. y Schwein.) Thüm.”], Mycoth. Univ., Cent. 5: no. 447. 1876.

= *Phragmopsora circaeae* (Thüm.) G. Winter [as “(Alb. y Schwein.) G. Winter”], Hedwigia 18: 171. 1879.

= *Uredo circaeae* Schumacher. [as “circaeae”], Enum. pl. 2: 228. 1803.

= *Caeoma onagrarium* Link, in Willdenow, Sp. pl., Edn 4, 6(2): 29. 1825.

= *Uredo fuchiae* Arthur y Holway, in Arthur, Amer. J. Bot. 5: 538. 1918.

= *Pucciniastrum fuchsiae* Hirats. f., J. Fac. Agric., Hokkaido Imp. Univ., Sapporo 21(1): 98. 1927.

Uredinio con soros hipófilos, pulvinados, solitarios o agrupados, de color amarillos; peridio hifoide, de color hialino; células peridiales romboides, variables en forma, de 5-13 x 5-10 µm; pared lisa, de color hialina; uredosporas sésiles, oblongas a subglobosas, de 17-28 x 12-20 µm; pared equinulada, menor o igual a 2.5 µm de grosor uniforme, de color hialina; poros germinativos oscuros.

Ciclo de vida: desconocido.

Material estudiado: *Fuchsia hartwegii* Benth. (Onagraceae): Putumayo, alrededor del poste kilómetro 75-76 desde Pasto, en la vía Pasto-Mocoa, 2499 m s.n.m., 26 de enero de 1976, Pablo Buriticá, K. P. Dumont, J. L. Luteyn y L. A. Molina, MMUNM 3477.

= *Fuchsia hybrida* hort. ex Siebert y Voss. (Onagraceae): Antioquia, El Santuario, vía El Santuario-Carmen del Viboral, vereda El Carmelo, 2249 m s.n.m., 16 de octubre de 2023, R. A. Aguirre, M. A. Manco y Sara Aguirre-Manco, MMUNM 4015.

Distribución geográfica: Alemania (Scholler *et al.*, 2022); Chile (Ferrada *et al.*, 2020); Italia (Garibaldi *et al.*, 2012) y en Colombia nuevo registro.

Comentarios: Espermogonio, Ecio y Telio no encontrados en el material estudiado; según Saccardo *et al.* (1882): telio presenta soros coalescentes, aplanados, cerosos, de color marrón amarillento; teliosporas poligonales, redondeadas, con longitud y ancho de hasta 30 µm y 26 µm, respectivamente, de color marrón pálido. Los estados espermogonio y ecio no han sido registrados para esta especie.

En Colombia, Buriticá et al. (2014) registran *Aecidium fuchsiae* H. S. Jackson y Holway sobre *Fuchsia putumayensis* Munz y *Fuchsia* sp., constituyéndose *P. circaeae* en la segunda especie sobre la familia Onagraceae en Colombia.

3. *Uredo chrysophyllicola* Hennings, Hedwigia 41: 106. 1902. (Figura 2a-c). Uredinio con soros hipófilos, solitarios o agrupados, pulverulentos, de color amarillo-dorados; paráfisis ausentes; uredosporas globosas, subglobosas y elipsoides, de 20-25 x 15-20 μm ; pared equinulada, de 2.5 μm de grosor uniforme, de color amarillo-dorado pálida; poros germinativos oscuros.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Brasil (Hennen et al., 2005) y en Colombia nuevo registro.

Material estudiado: *Chrysophyllum cainito* L. (Sapotaceae): Chocó, Nuquí, Arusí, 5 m s.n.m., 5 de agosto de 2002, Pablo Buriticá, MMUNM-3320.

Comentarios: en Colombia, sobre la familia Sapotaceae se registra la roya *Puccinia lucumae* Kern, Thurston y Whetzel sobre *Lucuma* sp. (Buriticá et al., 2014). La especie *U. chrysophyllicola* se constituye en la segunda especie sobre la familia Sapotaceae en Colombia.

4. *Uromyces sporobolicola* J. C. Lindq., Revista Fac. Agron. y Veter., La Plata, Ser. 3 38: 89. 1963. (Figura 2d-j).

Uredinio con soros anfigenos, predominantemente hipófilos, pulverulentos, de color amarillo-dorados; paráfisis ausentes; uredosporas globosas, de 22-30 x 7-25 μm ; pared equinulada, de 2.5 μm de grosor uniforme, de color amarillo-dorada; poros germinativos de 1-3 ecuatoriales. Telio con soros anfigenos, predominantemente hipófilos, pulverulentos, de color negros; teliosporas ovoides, oblongo-elipsoides, de 22-40 x 15-25 μm ; pared lisa, de 2.5 μm de grosor lateral, de 2.5-7.5 μm de grosor apical, de color marrón-canela; poros germinativos oscuros.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Argentina, Estados Unidos, México, República Dominicana (Cummins, 1971); Pakistán (Ishaq et al., 2012) y en Colombia nuevo registro.

Material estudiado: *Sporobolus indicus* (L.) R. Br. (Poaceae): Santander: kilómetro 12 desde los cursos vía Guaca, margen río Manco, vía a San Isidro, 21 de septiembre de 2001, Pablo Buriticá y Mauricio Salazar-Yepes, MMUNM-3454.

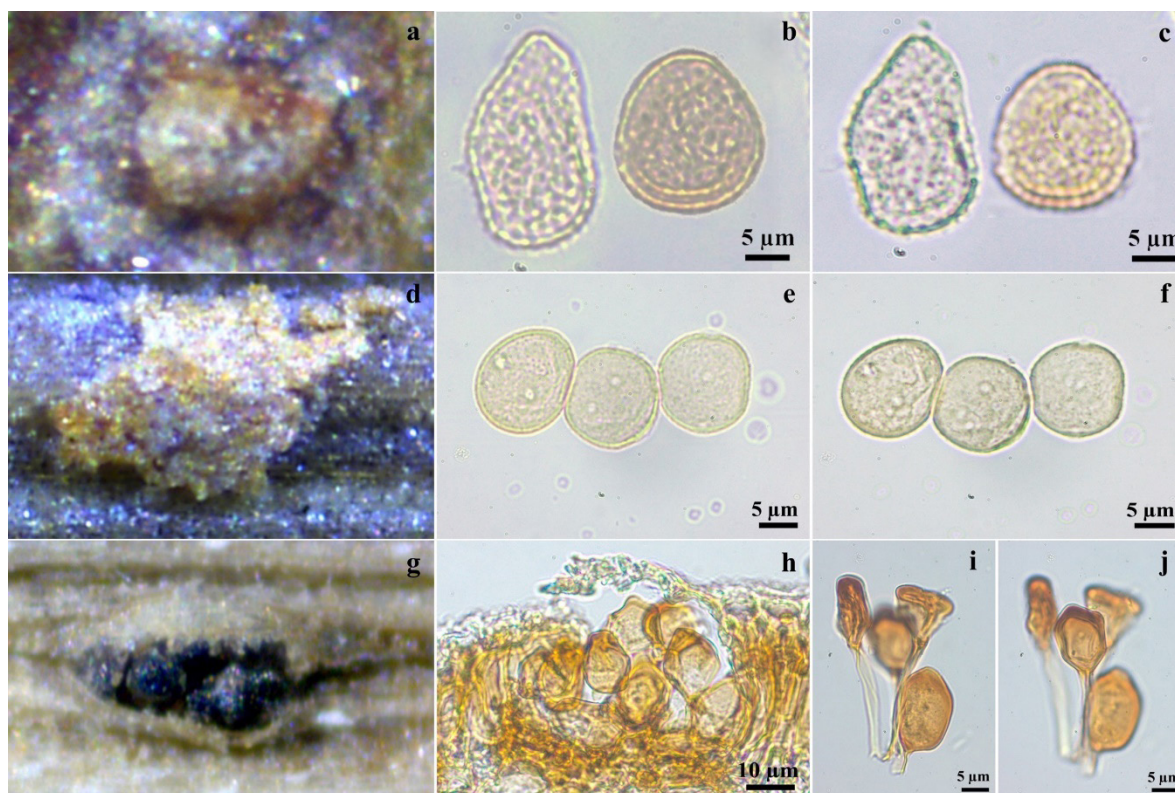


Figura 2. a-c. *Uredo chrysophyllicola*. a. Uredosoro. b-c. Uredosporas. b. En vista mediana. c. En vista superficial. d-j. *Uromyces sporobolicola*. d. Uredosoro. e-f. Uredosporas. e. En vista mediana con poros germinativos ecuatoriales (flechas). f. Uredosporas en vista superficial. g. Teliosoro. h. Sección transversal del teliosoro. i-j. Teliosporas. i. En vista mediana. j. En vista superficial.

Comentarios: En Colombia, Buriticá et al. (2014) registran sobre la especie *S. indicus* las royas *Physopella sporoboli* Pardo-Cardona y *Puccinia schedonnardi* Kellerm. y Swingle. La especie *U. sporobolicola* es el tercer registro sobre el género *Sporobolus* y el sexto del género *Uromyces* en la familia Poaceae en Colombia.

Nuevos hospedantes de la familia Poaceae parasitados por Pucciniales

Se presentan 16 nuevos registros de hospedantes de la familia Poaceae parasitados por una roya ya registrada en Colombia. A continuación, se listan en orden alfabético junto con información de sinónimos y basiónimos asociados, ciclo de vida, distribución geográfica y comentarios.

1. *Angiopsora paspalicola* (Hennings) Aime y McTaggart, Fungal Systematics and Evolution 7: 41. 2020.

= *Puccinia compressa* Arthur y Holway, en: Arthur, Proc. Amer. Phil. Soc. 64: 157. 1925.

= *Angiopsora compressa* (Arthur y Holway) Mains, Mycologia 26: 129. 1934.

= *Puccinia paspalicola* (Hennings) Arthur, Manual Rusts U.S. y Canadá. Purdue Res. Found. 127. 1934. = *Phakopsora compressa* (Mains) Cummins y Hiratsuka, Illus. Genera of Rust Fungi, Third Ed. APS. USA. p. 85. 2003.

= *Phakopsora compressa* (Arthur y Holway) Buriticá y Hennen, en: Buriticá, Rev. I.C.N.E. Medellín 5(2): 179. 1994. Anamorfo: *Physopella paspalicola* (Hennings) Buriticá y Hennen, en: Buriticá, Rev. I.C.N.E. Medellín 5(2): 179. 1994.

= *Uredo paspalicola* Hennings, Hedwigia 44: 57. 1905.

= *Physopella compressa* (Mains) Cummins y Ramachar, Mycologia 50(5): 742. 1959.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia, Valle del Cauca, Tolima (Buriticá et al., 2014) y Santander.

Material estudiado: *Paspalum virgatum* L.: Santander, kilómetro 80 desde Puerto Berrío, vía Lizama, kilómetro 40 antes de Lizama, 19 de septiembre de 2001, Pablo Buriticá y Mauricio Salazar-Yepes, MMUNM-3557.

Comentarios: en Colombia se registran cuatro especies pertenecientes al género *Paspalum* como hospederos de *A. paspalicola* (Buriticá et al., 2014).

2. *Puccinia araguata* Kern, Mycologia 30: 544. 1938.

= *Puccinia paspalicola* F. Kern, Thurst. y Whetzel, in Chardon y Toro, Monograph Univ. Puerto Rico, Series B 2: 284. 1934.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia (Salazar-Yepes, 2021) y Caquetá.

Material estudiado: *Paspalum densum* Poir.: Caquetá, milla 12 desde la vía Florencia hasta Florencia-Altamira, 16 de enero de 1976, Pablo Buriticá, K. P. Dumont, J. L. Luteyn y L. A. Molina, MMUNM-3655.

Comentarios: La roya *P. araguata* fue registrada en Colombia por primera vez por Barrera y Salazar-Yepes (2019) sobre *Paspalum saccharoides* Nees ex Trin., en el municipio de Támesis en el departamento de Antioquia.

3. *Puccinia chaetochloae* (Arthur) Arthur, Bull. Torrey bot. Club 34: 585. 1907.

= *Uredo chaetochloae* Arthur, Bull. Torrey bot. Club 33: 518. 1906.

= *Dicaeoma chaetochloae* (Arthur) Arthur, N. Amer. Fl. (Nueva York) 7(4): 288. 1920.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia, Caldas, Valle del Cauca (Buriticá et al., 2014) y Magdalena.

Material estudiado: *Paspalum paniculatum* L.: Magdalena, Sierra Nevada de Santa Marta, entre el refugio de la Sierra y Palo Alto, 1800 m s.n.m., 19 de junio de 1978, Pablo Buriticá, MMUNM-3575.

Comentarios: en Colombia, *P. chaetochloae* se ha registrado sobre *Paspalum macrophyllum* Kunth y *Paspalum virgatum* L. (Buriticá et al., 2014).

4. *Puccinia coronata* Corda, Icones fungorum hucusque cognitorum 1: 6, t. 2: 96. 1837. Anamorfo: *Aecidium rhamni* J.F. Gmel., en: Gmelin, Syst. Nat.: 1472. 1792.

= *Aecidium crassum* Persoon, Syn. meth. fung. 1: 208. 1801.

Ciclo de vida: macrocíclico.

Distribución geográfica: Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca, Nariño (Buriticá et al., 2014).

Material estudiado: *Anthoxanthum odoratum* L.: Nariño, Pasto, alrededor del poste kilómetro 4 en la vía desde Pasto hacia el aeropuerto, 2621 m s.n.m., 24 de enero de 1976, Pablo Buriticá, K. P. Dumont, J. L. Luteyn y L. A. Molina, MMUNM-3296.

Comentarios: el hospedante *A. odoratum* ha sido registrado en Colombia siendo parasitado por *Puccinia brachypodii* var. *poae-nemoralis* (Oth.) Cummins y Green y *Puccinia graminis* Persoon (Buriticá et al., 2014). La roya *P. coronata* encontrada en *A. odoratum* es un nuevo registro para Colombia, y amplía el rango de hospedantes de esta roya, la cual se destaca por afectar el cultivo de avena, donde genera pérdidas de rendimiento que oscilan entre el 15 % y 20 % (Nazareno et al., 2018).

5. *Puccinia graminis* Persoon., Neues Magazin für die Botanik 1: 119. 1794.

= *Puccinia linearis* Röhl, Deutschl. Fl. Ed. 2. III. 3: 132. 1813.

= *Puccinia cerealis* Martius, Prodr. Fl. Mosq. Ed. altera p. 227. 1817.= *Dicaeoma graminis* (Persoon) Gray, Nat. Arr. Brit. Pl. 1: 542. 1821.

= *Puccinia poculiformis* (Jacquin) Wettstend, Verh. Zool.-Bot. Ges. Wien. 35: 544. 1886.= *Puccinia anthistiriae* Barclay, J. Asiatic. Soc. Bengala 58: 246. 1889.

= *Puccinia jubata* Ellis y Bartholomew, Erythea 4: 2. 1896.

= *Puccinia megalopotamica* Spegazzini, Anal. Mus. nac. Hist. nat. B. Aires 6: 224. 1898.

= *Puccinia vilis* Arthur, Bull. Torrey bot. Club 28: 663. 1901.

= *Puccinia elymina* Miura, Fl. Manchuria y East Mongolia 3: 280. 1928.= *Puccinia brizae-maximi* Ramakrishnan, T.S. y Sund. Indian Phytopath. 6: 30. 1953.

= *Puccinia favargerii* Mayor, Rev. Mycol. 22: 273. 1957.

= *Puccinia albigensis* Mayor, Rev. Mycol. 22: 279. 1957.

Ciclo de vida: macrocíclico.

Distribución geográfica: Antioquia, Boyacá, Caldas, Cundinamarca (Buriticá et al., 2014).

Material estudiado: *Lolium perenne* L.: Boyacá, kilómetro 3 desde Samacá hacia el Puente de Boyacá, 30 de septiembre de 2001, Pablo Buriticá y Mauricio Salazar-Yepes, MMUNM-3251.

Comentarios: los hospedantes de los géneros *Agrostis*, *Anthoxanthum*, *Avena*, *Calamagrostis*, *Echinochloa*, *Hordeum*, *Phalaris*, *Phleum*, *Sporobolus*, *Stipa* y *Triticum* han sido reportados en Colombia como hospederos de *P. graminis* (Buriticá et al., 2014). La roya *P. graminis* es una especie de importancia económica en el cultivo de trigo, en el que los rendimientos se ven afectados por la reducción del tamaño del grano y el volcamiento del tallo de la planta (Figueroa et al., 2018). En el cultivo de avena esta roya puede generar pérdidas de rendimiento entre el 12 % para variedades resistentes y el 22 % en variedades susceptibles (Leyva et al., 2004).

6. *Puccinia hordei* G.H. Oth, Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Bern 711-744: 114. 1871. Anamorfo: *Aecidium ornithogaleum* Bubák, Annls Mycol. 3(3): 223. 1905.

Ciclo de vida: macrocíclico.

Distribución geográfica: Antioquia, Cundinamarca (Buriticá et al., 2014) Caldas y Santander.

Materiales estudiados: *Bromus catharticus* Vahl.: Caldas, Páramo del Ruiz, 3900 m s.n.m., 15 de septiembre de 2001, Mauricio Salazar-Yepes y Adriana Arango, MMUNM-3249. *Bromus pitensis*

Kunth.: Santander, Páramo de Berlín, 3500 m s.n.m., 24 de septiembre de 2001, Pablo Buriticá y Mauricio Salazar-Yepes, MMUNM-3250.

Comentarios: los hospedantes *Festuca dertonensis* (All.) Asch. y Graebn., *Holcus lanatus* L. y *Hordeum vulgare* L. han sido registrados como hospederos de la roya *P. hordei* (Buriticá et al., 2014). Los hospedantes *B. catharticus* y *B. pitensis* son nuevos registros para Colombia y amplían el rango de hospederos *P. hordei*. Esta roya, a nivel global, ha llegado a generar pérdidas de rendimiento que oscilan entre el 30 % y el 60 % en el cultivo de cebada (Nazareno et al., 2023).

7. *Puccinia huberi* Hennings, Hedwigia Beibl. 39: 76. 1900.

= *Dicaeoma huberi* (Hennings) Arthur y Fromme, N. Amer. Fl. (Nueva York) 7(4): 287. 1920.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia, Putumayo (Buriticá et al., 2014).

Material estudiado: *Panicum polygonatum* Schrad.: Antioquia, kilómetro 17 vía Armenia Mantequilla-Titiribí, cañón del río Añil, 960 m s.n.m., 7 de junio de 2001, Pablo Buriticá, Víctor Manuel Pardo y Mauricio Salazar-Yepes, MMUNM-3439.

Comentarios: el hospedero *P. polygonatum* se considera un nuevo registro para la roya *P. huberi* en Colombia.

8. *Puccinia inclita* Arthur, Bull. Torrey bot. Club 46: 115. 1919.= *Dicaeoma inclitum* (Arthur) Arthur y Fromme, N. Amer. Fl. (Nueva York) 7 (4-5): 289. 1920.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia, Caldas (Buriticá et al., 2014).

Material estudiado: *Ichnanthus tenuis* (J. Presl) Hitchc. y Chase.: Antioquia, Medellín, Universidad Nacional de Colombia campus El Volador, 1495 m s.n.m., 4 de mayo de 2021, María Camila Gutiérrez Castaño, Mauricio Salazar-Yepes, MMUNM-3894.

Comentarios: el hospedante *I. tenuis* es un nuevo registro para la roya *P. inclita*, la cual ha sido registrada en otras especies del género *Ichnanthus* en el departamento de Antioquia (Buriticá et al., 2014).

9. *Puccinia macra* Arthur y Holway, en: Arthur, Am. J. Bot. 5: 465. 1918.

= *Dicaeoma macrum* (Arthur y Holway) Arthur y Fromme, N. Amer. Fl. (Nueva York) 7(4): 287. 1920.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia, Caldas, Cundinamarca, Norte de Santander (Buriticá et al., 2014).

Material estudiado: *Paspalum notatum* Flügge: Caldas, Manizales, kilómetro 1 desde la entrada de la Reserva Río Blanco hacia la represa Olivares, 2500 m s.n.m., 23 de julio de 2002, Pablo Buriticá, Mauricio Salazar-Yepes y Paola Rodríguez, MMUNM-3576.

Comentarios: los hospedantes *Paspalum candidum* (Humb. y Bonpl. ex Flügge) Kunth, *P. paniculatum* L. y *P. prostratum* Scribn. y Merr. han sido registrados parasitados por *P. macra* por Buriticá et al. (2014).

10. *Puccinia oahuensis* Ellis y Everhert, Bull. Torrey bot. Club 22: 435. 1895.

= *Puccinia digitariae* Pole-Evans, Ann. Bolus Herb. 2: 111. 1917.

= *Puccinia digitariae-velutinae* Viennot-Bourgin, Bull. Soc. Mycol. France 65: 432. 1951. Anamorfo: *Uredo digitariaecola* Thuemen, Mycoth. Univ. no. 2041. 1882.

= *Uredo digitariae-ciliaris* Mayor, Bull. Soc. Neuchâtel. Sci. Nat. 41: 101. 1915. = *Uredo duplicata* Rangel, Arq. Mus. Nac. Rio de Janeiro 18: 160. 1916.

= *Uredo syntherismae* Spegazzini, Anal. Mus. nac. Hist. nat. B. Aires 31: 398. 1922.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia, Caldas (Buriticá et al., 2014) y Valle del Cauca.

Material estudiado: *Digitaria ciliata* Lag.: Valle del Cauca, Palmira, corregimiento La Buitrera, vía a la Reserva Natural Nirvana-Arenillo Pradera, 1597 m s.n.m., 21 de septiembre de 2017, estudiantes del curso hongos fitoparásitos y Mauricio Salazar-Yepes, MMUNM-3466.

Comentarios: se han registrado como hospederos de *P. oahuensis* en Colombia a *Digitaria decumbens* Stent. y *D. sanguinalis* (L.) Scop. (Buriticá et al., 2014). La roya *P. oahuensis* es un nuevo registro para el Valle del Cauca.

11. *Puccinia substriata* Ellis y Bartholomew, Erythea 5: 47. 1897.

= *Puccinia tubulosa* (Patouillard y Gaillard) Arthur, Am. J. Bot. 5: 464. 1918.

= *Puccinia pilgeriana* Hennings, Bot. Jahrb. Syst. 40: 226. 1908. = *Puccinia penniseti* Zimmerman, Bericht über Land und Forstwirth. Deutsch Ostafrika. 1904. Anamorfo: *Aecidium tubulosum* Patouillard y Gaillard, Bull. Soc. Myc. France 4: 97. 1888.

= *Aecidium uleanum* Pazschke, Hedwigia 31: 95. 1892.

= *Aecidium solaniphilum* Spegazzini, Anal. Mus. nac. Hist. nat. B. Aires 23: 34. 1912. *Uredo cubangoensis* Rangel, Arq. Mus. Nac. Río de Janeiro 18: 160. 1916.

= *Puccinia paspalicola* (Hennings) Arthur, Manual Rusts U.S. y Canadá. Purdue Res. Found. p. 127. 1934.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia, Caldas, Huila, Quindío, Sucre, Tolima y Valle del Cauca (Buriticá et al., 2014).

Material estudiado: *Digitaria bicornis* (Lam.) Roem. y Schult.: Antioquia, Medellín, urbanización Jorge Robledo, 7 de agosto de 1995, Pablo Buriticá, MMUNM-3467.

Digitaria ciliata Lag. (= *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler): Antioquia, Támesis, kilómetro 2 vía Támesis-San Pablo, 1420 m s.n.m., 20 de noviembre de 2006, Pablo Buriticá, M. M. López y C. Rodríguez, MMUNM-3465.

Comentarios: los hospedantes *D. ciliata* y *D. bicornis* son nuevos registros para la roya *P. substriata* en Colombia, destacando este primero por su amplio uso como forraje, además de reportar características medicinales y potencial biorremediador de suelos degradados (ColPlantA, 2024).

12. *Uromyces eragrostidis* Tracy, J. Mycol. 7: 281. 1893.

= *Uromyces pedicellata* Evans, Bull. Misc. Inf. Kew 1918: 228. 1918.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia (Salazar-Yepes, 2021).

Material estudiado: *Eragrostis tenuifolia* (A. Rich.) Hochst. ex Steud.: Antioquia, Medellín, Universidad Nacional de Colombia campus El Volador, 1495 m s.n.m., 16 de diciembre de 2019. María Camila Gutiérrez Castaño, Mauricio Salazar-Yepes, MMUNM-3613.

Comentarios: la roya *U. eragrostidis* ha sido registrada parasitando a *Eragrostis ciliaris* (L.) R. Br., *E. pilosa* (L.) Beauv. y *E. tephrosanthos* Schult. en Colombia (Buriticá et al., 2014).

13. *Uromyces setariae-italicae* Yoshino, Bot. Mag. Tokyo 20: 247. 1906.

= *Uredo henningsii* Saccardo y D. Saccardo, Syll. Fung. 17: 456. 1905.

= *Uromyces leptodermus* Sydow y P. Sydow, en: Sydow, P. Sydow y E. J. Butler, Annls Mycol. 4(5): 430. 1906. Anamorfo: *Uredo setariae-italicae* Dietel, Bot. Jahrb. 32: 632. 1903.

= *Puccinia panicola* Arthur, Bull. Torrey bot. Club 34: 586. 1907.

= *Uredo panici* Hennings, Hedwigia 43: 165. 1904. = *Uredo isachnes* Sydow y P. Sydow, en: Sydow, P. Sydow y E. J. Butler, Annls Mycol. 4(5): 424. 1906.

= *Uredo panici-prostrati* Sydow y P. Sydow, en: Sydow, P. Sydow y E. J. Butler, Annls Mycol. 4(5): 444. 1906.

= *Uredo eriochloae* Sydow y P. Sydow, en: Sydow, P. Sydow y E. J. Butler, Annls Mycol. 4(5): 444. 1906.

= *Uredo panici-maximi* Rangel, Arq. Mus. Nac. Río de Janeiro 18: 160. 1916.

= *Uredo panici-villosi* Petch, An. Roy. Bot. Gard. Peradeniya 7: 295. 1922.

= *Uredo melinidis* Kern, Mycologia 30: 550. 1938.

Ciclo de vida: desconocido.

Distribución geográfica: Antioquia, Caldas, Cundinamarca, Quindío, Santander, Tolima, Valle del Cauca (Buriticá et al., 2014).

Material estudiado: *Brachiaria decumbens* Stapf. Cundinamarca, Cochipay, finca Las Mesitas, 11 de diciembre de 1977, Pablo Buriticá, MMUNM-3574. *Melinis repens* (Willd.) Zizka.: Cundinamarca, kilómetro 3 desde Apolo hacia Tocaima, 20 de septiembre de 2001, Pablo Buriticá y Mauricio Salazar-Yepes, MMUNM-3302.

Comentarios: la roya *U. setariae-italicae* se ha reportado en Colombia parasitando a *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweick., *B. mutica* Griseb. (= *Panicum barbinode* Trin.), *B. plantaginea* (Link) Hitchc., *B. radicans* Napper y *Melinis minutiflora* P. Beauv. (Buriticá et al., 2014).

Discusión

En el trabajo se describen nuevos registros de especies de royas y de sus hospedantes parasitados en Colombia, recolectadas sobre las familias Onagraceae, Poaceae y Sapotaceae. Las royas *P. circaeae*, *U. chrysophyllicola* y *U. sporobollicola* son provenientes de Chocó, Putumayo y Santander, departamentos con pocos registros de Pucciniales en la actualidad, por lo que se hace necesario aumentar el estudio y conocimiento de estos importantes parásitos de plantas, en especial en lugares reconocidos por su alta diversidad biológica como los departamentos de Chocó y Putumayo.

Es de destacar que royas de importancia económica como *P. coronata*, *P. graminis* y *P. hordei* amplían su rango de hospederos. Estos hallazgos conllevan a modificaciones en las prácticas agronómicas en los cultivos de avena, cebada y trigo, para prevenir y controlar brotes en los departamentos de Antioquia, Boyacá, Cundinamarca, Nariño y Santander.

Las royas reportadas en este trabajo sobre diferentes especies forrajeras (*P. virgatum*, *P. paniculatum*, *L. perenne*, *B. catharticus*, *P. notatum*) constituyen un importante registro, ya estos hongos podrían afectar el rendimiento y calidad de los forrajes.

Conclusiones

Este trabajo permite adicionar nuevos registros de especies de royas en plantas nativas e introducidas en Colombia. Los estudios micológicos que tengan como finalidad estudiar la funga de Pucciniales presentes en el territorio nacional deben ser prioritarios, con

el fin de aprovechar y preservar tanto las especies vegetales como los hongos roya que las parasitan, y por su importancia como potenciales agentes causales de enfermedad o posibles controladores biológicos de arvenses.

Agradecimientos

Al Museo Micológico de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, por facilitar el espacio, los materiales vegetales estudiados, herramientas, equipos y base de datos; de igual forma, al herbario Gabriel Gutiérrez Villegas (Medel) por la identificación del material vegetal.

Referencias

- Álvarez-Morales, L. C.; Morales-Osorio, J. G. y Salazar-Yepes, M. (2022). First report of *Puccinia lagenophorae* Cooke on *Senecio* spp. in Colombia. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 44(5), 689-694. <https://doi.org/10.1080/07060661.2022.2064922>
- Barrera Enríquez, V. P. y Salazar-Yepes, M. (2019). Nuevos registros de Pucciniales de Colombia, incluyendo *Uredendo anthurii* sp. nov. y *Uromyces colombiana* sp. nov. *Boletín científico Centro de Museos. Museo de Historia Natural*, 23(2), 95-105. <https://doi.org/10.17151/bccm.2019.23.2.4>
- Buriticá, P.; Salazar-Yepes, M. y Pardo-Cardona, V. M. (2014). Pucciniales (fungi), Royas de Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 67(2), 1-93. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/44181>
- ColPlantA. (2024). *Useful plants of Colombia*. Royal botanic gardens, Kew. <https://colplanta.org/>
- Cossu, T.; Lücking, R.; Vargas-Estupiñán, N.; Carretero, J.; Vasco-Palacios, A.; Moncada, B.; Kirk, P.; de Almeida, R. F.; Gaya, E.; Coca, L. F.; de Souza, J.; Díaz-Escandón, D.; Franco-Molano, A. E.; Gómez-Montoya, N.; González-Cuellar, F. E.; Jaramillo-Ciro, M. M.; Motato-Vásquez, V.; Niño-Fernández, Y. M.; Ortiz-Moreno, M. L.; Peña-Cañón, E. R.; Piepenbring, M.; Ramírez-Castrillón, M.; Salazar-Yepes, M.; Sanjuan, T.; Simijaca, D.; Soto-Medina, E. y Diazgranados, M. (2022). Annotated checklist of fungi of Colombia. En R. F. de Almeida; R. Lücking; A. M. Vasco-Palacios; E. Gaya y M. Diazgranados (eds.), *Catalogue of Fungi of Colombia* (pp. 210-216). Richmond: Kew Publishing Royal Botanic Gardens.
- Cummins, G. B. (1971). *The rust fungi of cereals, grasses and bamboos*. Nueva York: Springer-Verlag.
- Ferrada, E. E.; Böhm, L.; Montenegro, O.; Llancao, M.; Romero, C.; Briceño, E. X.; Morales, R. A. y Díaz, G. A. (2020). First report of leaf rust of *Fuchsia magellanica* caused by *Pucciniastrum circaeae* in Valdivia, Chile. *Plant Disease*, 104(5), 1548-1548. <https://doi.org/10.1094/pdis-11-19-2356-pdn>
- Figueroa, M.; Hammond-Kosack, K. E. y Solomon, P. S. (2018). A review of wheat diseases-a field perspective. *Molecular Plant Pathology*, 19(6), 1523-1536. <https://doi.org/10.1111/mpp.12618>
- Garibaldi, A.; Gilardi, G.; Ortu, G. y Gullino, M. L. (2012). First report of rust caused by *Pucciniastrum circaeae* on *Fuchsia × hybrida* in Italy. *Plant Disease*, 96(4), 588. <https://doi.org/10.1094/pdis-11-11-0976-pdn>
- Hennen, J. F.; Figueiredo, M. B.; de Carvalho Jr., A. A. y Hennen, P. G. (2005). *Catalogue of the species of plant rust fungi (Uredinales) of*

- Brazil. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro.
- Ishaq, A.; Afshan, N. S. y Khalid, A. N. (2012). New records of poaceous rusts from Pakistan. *Mycotaxon*, 118(1), 237-244. <https://doi.org/10.5248/118.237>
- Leyva-Mir, S. G.; Espitia-Rangel, E.; Villaseñor-Mir, H. E. y Huerta-Espino, J. (2004). Pérdidas ocasionadas por *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* Eriks. y Henn. causante de la roya del tallo en seis cultivares de avena (*Avena sativa* L.) en los valles altos de México. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 22(2), 166-171. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61222202>
- Nazareno, E. S.; Li, F.; Smith, M.; Park, R. F.; Kianian, S. F. y Figueroa, M. (2018). *Puccinia coronata* f. sp. *avenae*: a threat to global oat production. *Molecular Plant Pathology*, 19(5), 1047-1060. <https://doi.org/10.1111/mpp.12608>
- Nazareno, E. S.; Matny, O.; Jin, Y.; Fetch, T. Jr.; Rouse, M. N. y Steffenson, B. J. (2023). Virulence dynamics of the barley leaf rust pathogen (*Puccinia hordei*) in the United States from 1989 to 2020. *Plant Disease*, 107(12), 3952-3957. <https://doi.org/10.1094/pdis-03-23-0583-re>
- Saccardo, P. A.; Traverso, G. B. y Trotter, A. (1882). *Sylloge fungorum Omnium Hucusque Cognitorum*. Vol. IX. Sumptibus auctoris. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.5371>
- Salazar-Yepes, M. (2021). *Pucciniales (Roya) del departamento de Antioquia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.
- Salazar-Yepes, M. y Piepenbring, M. (2022). Diversity of Rust and Smut Fungi of Colombia. En R. F. de Almeida; R. Lücking; A. M. Vasco-Palacios; E. Gaya y M. Diazgranados (eds.), *Catalogue of Fungi of Colombia* (pp. 114-120). Richmond: Kew Publishing Royal Botanic Gardens.
- Scholler, M.; Braun, U.; Buchheit, R.; Schulte, T. y Bubner, B. (2022). Studies on European rust fungi, Pucciniales: molecular phylogeny, taxonomy, and nomenclature of miscellaneous genera and species in Pucciniastraceae and Coleosporiaceae. *Mycological Progress*, 21. <https://doi.org/10.1007/s11557-022-01810-3>

Chemical composition of *Pennisetum purpureum* silages with inclusion of dehydrated *Bixa orellana* residue

Composición química de ensilajes de *Pennisetum purpureum* con inclusión de residuo deshidratado de *Bixa orellana*

Bruno Rafael Santos Borges ^{1,3}, Lucien Bissi da Freiria ^{1,4}, Túlio Otávio de Jardim D'Almeida Lins ^{1,5}, Emerson Silva Miranda ^{2,6}, Alan Andrade Mesquita ^{1,7}, Fagton de Mattos Negrão ^{1,8}.

¹Federal Institute of Rondônia (IFRO). Colorado do Oeste – RO, Brasil. ²Federal University of Mato Grosso (UFMT). Cuiabá – MT, Brasil.

³ ✉ brunoborges0615@gmail.com; ⁴ ✉ lucien.freiria@ifro.edu.br; ⁵ ✉ tulio.jardim@ifro.edu.br; ⁶ ✉ s.emersonmiranda@gmail.com;

⁷ ✉ alan.mesquita@ifro.edu.br; ⁸ ✉ fagton.negrao@ifro.edu.br



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.113673>

2024 | 73-1 p 49-54 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-03-26 Acep.: 2025-01-29

Abstract

This study aimed to evaluate the fermentative characteristics and the chemical composition of *Pennisetum purpureum* cv. Roxo silages with addition of dehydrated *Bixa orellana*. A completely randomized design with four treatments (0, 15, 30, and 45 g kg⁻¹) and five replicates was used. The variables analyzed were pH, ammoniacal nitrogen, effluent loss and dry matter recovery, and dry matter, crude protein, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, and hemicellulose content. The data were subjected to analysis of variance and regression at a 5 % probability level ($p < 0.05$) using the statistical package SISVAR[®]. A linear increase of 0.0038 and 0.3305 percentage units was observed for each 1 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue included, on pH and dry matter recovery. Ammoniacal nitrogen and effluent loss values reduced linearly by 0.0096 and 0.2473 percentage units. Each 1 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue included in the *Pennisetum purpureum* silage promoted a linear increase of 0.4235, 0.1333, 0.5347, and 0.6450 percentage units in dry matter, crude protein, and neutral detergent fiber and hemicellulose, respectively. There was a reduction of 0.1107 percentage units in acid detergent fiber content. It was concluded that dehydrated annatto residue has the potential to serve as a silage moisture sequestrant for use in ruminant feed.

Keywords: Additive, agro-industrial coproduct, forage conservation, moisture sequestrant, qualitative characteristics.

Resumen

El objetivo del estudio fue evaluar las características fermentativas y la composición química de ensilajes de pasto *P. purpureum* cv. Roxo con adición de residuo deshidratado de *Bixa orellana*. Se utilizó un diseño completamente al azar con cuatro tratamientos (0, 15, 30 y 45 g kg⁻¹) y cinco repeticiones. Las variables analizadas fueron pH, nitrógeno amoniacal, pérdidas de efluentes y recuperación de materia seca, contenido de materia seca, proteína bruta, fibra detergente neutra, fibra detergente ácida y contenido de hemicelulosa. Los datos fueron sometidos a análisis de varianza y regresión al 5 % de probabilidad ($p < 0.05$) utilizando el paquete estadístico SISVAR[®]. Se observó un aumento lineal de 0.0038 y 0.3305 unidades porcentuales en el pH y la recuperación de materia seca por cada 1 g kg⁻¹ de residuo de achiote deshidratado incluido. Los valores de nitrógeno amoniacal y las pérdidas de efluentes se redujeron linealmente en 0.0096 y 0.2473 unidades porcentuales. Cada 1 g kg⁻¹ de residuo de achiote deshidratado incluido en el ensilaje de pasto elefante promovió un aumento lineal de 0.4235, 0.1333, 0.5347 y 0.6450 unidades porcentuales en materia seca, proteína bruta y fibra detergente neutra y hemicelulosa, respectivamente. Hubo una reducción de 0.1107 unidades porcentuales en el contenido de fibra detergente ácida. Se concluyó que el residuo de achiote deshidratado tiene el potencial de secuestrar la humedad del ensilaje para su uso en alimentos para rumiantes.

Palabras claves: aditivo, coproducto agroindustrial, conservación de forrajes, secuestrante de humedad, características cualitativas.

Introduction

Brazil has great potential for pasture-based livestock production, mainly due to its large availability of sunlight and water, in addition to its vast territorial extension (Barbero *et al.*, 2021). These facts made it the world's largest producer and exporter of beef in 2024, according to the United States Department of Agriculture (USDA) and the Brazilian Agricultural Research Corporation (Florentino, 2024).

The practice of ensiling began in Brazil at the end of the 19th century. However, from 1920 onwards, when the import of machines and tractors gained strength in the country, the technique spread over the years, initially with corn and then with sorghum and elephant grass in the 1960s (Daniel *et al.*, 2019).

Studies are needed to develop conservation techniques that maximize surplus production during the rainy season of the year, aiming to use it during the dry period when forage is scarce. One of these conservation techniques is ensiling, which consists of preserving harvested green plants in a moist state via fermentative processes while maintaining their nutritional value (Negrão *et al.*, 2024).

One of the most commonly used grasses for silage production is *Pennisetum purpureum* Schumacher (elephant grass). An important factor about *P. purpureum* is its nutritional balance point, suitable for silage production. It culminates in high moisture content, low soluble carbohydrate content, and high buffering power, which can negatively influence fermentation.

Because of its low production costs, elephant grass silage has been an alternative for animal supplementation, since it has high productivity and good palatability. However, due to its ideal cutting time, it has a high moisture content, which can interfere in the fermentation process, causing loss of nutrients. Therefore, the use of different additives in this silage is one of the alternatives that aims to minimize nutritional losses and enhance production quality.

According to McDonald (1981), plants ensiled with high moisture produce a large number of effluents, which carry highly digestible nutrients, sugars, and organic acids, reducing the nutritional value of the silage. One way to reduce these losses is the addition of a co-product with high hygroscopic powder that benefits fermentation during the forage conservation process, such as annatto (*Bixa Orellana* L.) residue (Rêgo *et al.*, 2010), bean (*Phaseolus vulgaris* L.) residue (Negrão *et al.*, 2020), or rice bran (*Oryza sativa*) (Santos *et al.*, 2024).

It was hypothesized that including dehydrated annatto residue would increase the dry matter of the ensiled forage and, consequently, the crude protein content of the silage produced. Considering the

availability of annatto and its residues, the objective was to evaluate the chemical composition and losses of *P. purpureum* cv. Roxo silages with the inclusion of dehydrated annatto residue.

Materials and methods

The experiment was conducted at the Federal Institute of Science and Technology – IFRO, on the Colorado do Oeste campus, which is located in the municipality of Colorado do Oeste/RO, at coordinates 13°07'39"S 60°29'68"W, at 410 m of altitude, climate type Aw, according to Köppen's classification, hot and humid tropical, characterized by two well-defined seasons: dry and hot from April to September and rainy and hot from October to March.

The *P. purpureum* cv. Roxo used in the research was already established without fertilization. Before its use, a standardization cut was made close to the ground. The grass was cut for the ensiling process in January 2018, when there was high rainfall, with an average height of 1.80 m.

The experiment was carried out in a completely randomized design with four treatments and five replications. Based on the natural matter of the grass, the treatments consisted of *P. purpureum* cv. Roxo silage without the inclusion of dehydrated annatto residue, *P. purpureum* cv. Roxo silage + 15 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue, *P. purpureum* cv. Roxo silage + 30 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue, and *P. purpureum* cv. Roxo silage + 45 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue.

The annatto residue was obtained in partnership with an annatto processing company in the municipality of Cabixi-RO. Due to its high moisture content, it was necessary to dry it in a forced circulation oven at 65 °C for 72 hours. After drying, the residue was crushed using a Thomas Willey knife mill equipped with a 1 mm mesh sieve.

The dehydrated annatto residue and the *P. purpureum* cv. Roxo forage mass were homogenized on plastic canvas according to each treatment, then placed into the experimental bags and manually compacted using an iron socket, whose lower part was shaped to ensure proper compaction inside the bag.

The silages were prepared in PVC bags of 0.1 m in diameter and 0.40 m in height, with a volume of 3.14 x 10⁻³ m³, provided with "Bunsen" type valves to allow the free escape of fermentation gases. Approximately 2 kg of the material was weighed and compacted using a wooden stick, reaching a standardized degree of compaction of 700 to 800 kg/m³ for all samples. Correct compaction is important to exclude as much oxygen as possible and ensure anaerobic conditions favouring the preservation of nutrients. 1 kg of fine sand was placed, separated

from the forage by a layer of fine screen (shading), to capture effluent. After weighing each bag, they were sealed with hot glue to prevent effluent leakage and stored in a cool, ventilated place.

The experimental silos were stored in a covered area at room temperature and opened 40 days after sealing. A completely randomized design was used with four replicates per treatment. Dehydrated annatto was added at the time of ensiling, according to the treatment, taking care to ensure good homogenization of the material, using 0, 15, 30 and 45 g kg⁻¹, based on the natural material and the chemical composition determined in the Bromatology and Animal Feeding Laboratory of the Federal Institute of Rondônia, Colorado do Oeste campus. The mixture of the additive with the chopped grass was prepared on a plastic tarp to prevent contact of the material with the floor surface, thus avoiding possible contamination. The chemical composition of *P. purpureum* cv. Roxo and dehydrated annatto residue used for ensiling is shown in Table 1.

Losses due to effluents, gases and total dry matter (DM) were quantified according to equations proposed by Jobim *et al.* (2007). Effluent production was measured by calculating the difference in weights of the bag and TNT bag with sand before and after ensiling, in relation to the amount of natural material in the ensiled sample. After opening (40 days) the material in the experimental bag, the set (silo + lid + TNT with wet sand + screen) was weighed and the production of effluent drained to the bottom of the bag was estimated by subtracting the weight of the same set before ensiling, according to Equation 1:

$$E \text{ (kg/ton GF)} = [(Psvaa - Ts)] - (Psa - Ts) / GFfi \times 100 \text{ Eq.1}$$

Where:

E (kg/ton NM): Effluent losses;

Psvaa: Weight of the whole bag (kg) when closing the silage;

Ts: Bag tare;

Psa: Weight of the bag with sand (kg) before adding the chopped green forage;

GFfi: Green forage mass (kg) used to make the silage.

Table 1. Chemical composition (average values) of *P. purpureum* cv. Roxo and dehydrated annatto residue (*B. orellana*) before the ensiling procedure

	DM (%)	CP (%)	NDF (%)	ADF (%)	HEM (%)
<i>Pennisetum purpureum</i> cv. Roxo	14.60	5.96	43.62	30.75	12.86
<i>Bixa orellana</i> residue	81.24	12.65	75.43	24.01	51.40

DM: dry matter, CP: crude protein, NDF: neutral detergent fiber, ADF: acid detergent fiber, HEM: hemicellulose.

The loss of dry matter resulting from gas production was determined by the difference between the gross weight of dry matter in the ensilage and at the opening, in relation to the quantity of dry matter ensiled, subtracting the weight of the ensiled set at both stages from the total ensiled weight, according to Equation 2:

$$G \text{ (\% DM)} = [(Pschf - Pscha) / (NMfi \times DNfi)] \times 1000 \text{ Eq.2}$$

Where:

G (% DM): Gas losses;

Pschf: Weight of the full bag (kg) at the closing of the silage;

Pscha: Weight of the full bag (kg) at the opening;

NMfi: Natural mass (kg) of ensiled forage;

DMfi: Dry matter (%) of ensiled forage.

Total dry matter recovery was determined by the difference between the gross weight of dry matter at ensiling and at opening, in relation to the amount of dry matter ensiled, according to Equation 3:

$$RDM \text{ (\%)} = (GFfo \times DMfo) / (DMi \times DMsi) \times 100 \text{ Eq.3}$$

Where:

RDM (%): Dry matter recovery;

GFfo: Forage green mass (kg) at the time of ensiling;

DMfo: Forage dry matter (%) at the time of ensiling;

DMi: Silage mass (kg) at the opening of the bags;

DMsi: Silage dry matter (%) at the opening of the bags.

Upon opening the bag, a surface layer of 5 cm was discarded, and only the central portion of each experimental bag was considered. A sample of approximately 550 g of silage was collected, packed in plastic bags, and stored in a freezer.

Subsequently, a 50 g subsample was taken, to which 100 mL of distilled water was added. Then, the mixture was blended for 1 minute. The resulting sample was filtered through filter paper, and its pH was measured using a bench potentiometer (Detmann *et al.*, 2012). The analysis of ammonia nitrogen was carried out according to the methodology described by Detmann *et al.* (2012).

Afterward, the silage samples were packed in paper bags and pre-dried in an oven with forced air circulation regulated at 65 °C for 72 hours. Subsequently, the samples were ground using a stationary Thomas-Willey knife mill equipped with a 1 mm sieve and stored in polyethylene containers to evaluate the chemical composition.

Laboratory analyses were carried out to determine the contents of dry matter (DM), crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), and hemicellulose (HEM), according to methodologies described by Detmann *et al.* (2012).

The data obtained regarding pH, ammonia nitrogen, loss through effluents, recovery of dry matter, and chemical constituents of *P. purpureum* cv. Roxo silages with the inclusion of dehydrated annatto residue were statistically analysed using analysis of variance (t-test). In cases of statistical significance, regression analysis was performed, testing first- and second-degree polynomial models at a 5 % level of significance, using the SISVAR® statistical package.

Results and discussion

A linear increase ($p < 0.05$) of 0.0038 percentage units was observed on pH values with the inclusion of dehydrated annatto residue (Table 2). The increases in pH values were 3.78, 3.91, 3.94, and 3.96 with the addition of 0, 15, 30, and 45 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue in grass silage, respectively. Even with this increase, which is somewhat undesirable, the pH remained at values considered adequate and characteristic of proper fermentation (between 3.8 and 4.2), which prevents proteolysis and the consequent production of butyric acid (McDonald, 1981).

Yeasts are present in all phases of ensiling; however, when present during the anaerobic phase, they compete with lactic acid-producing bacteria for the sugars available in the medium, reducing the production of lactic acid and, consequently, increasing the pH. Another factor that may have contributed to the inhibition of lactic acid-producing bacteria is the presence of organic solvents used in the bixin extraction process, which, due to their nature, may have caused a toxic effect on fermentative lactic acid bacteria (Muck, 2010).

Garcez *et al.* (2023) evaluated Tifton 85 silages in natura with and without the addition of corn, soybean, and rice bran, in order to determine if there was an improvement in the conservation and nutritional value of the ensiled product. The

authors did not observe significant differences in the pH values of the silages obtained and throughout the times of aerobic exposure. However, after 144 hours of air exposure, a loss of aerobic stability was observed in the silages added with soybean and rice bran, leading to an increase in the pH values by more than 0.2 units in relation to the pH at the time the bags were opened.

For ammonia nitrogen (N-NH₃) values, a reduction ($p < 0.05$) of 0.0096 percentage units was observed for each 1 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue included in *P. purpureum* cv. Roxo silage (Table 2). For all addition levels, the silages presented satisfactory N-NH₃ levels, remaining below 12 g kg⁻¹, that, according to McDonald (1981), is the limit value below which good quality silages are classified.

Araújo *et al.* (2021) evaluated the fermentation characteristics, sensory analysis and aerobic stability of Piata grass (*Urochloa brizantha*) silages with addition of 0, 2.5, 5 and 7.5 % of curauá fiber residue and observed a linear reduction in gas production, an increase in the N-NH₃/N-total content in the treatments with 0 %, 2.5 % and 5 % addition, and a reduction in the N-NH₃/N-total content in the treatment with 7.5 %. There was also an increase in pH values. Only the treatment with 2.5 % of curauá (*Ananas erectifolius*) residue showed a break in stability. The analyzed silages showed little aerobic deterioration. The authors concluded that the inclusion of curauá fiber residue in the Piata grass silage contributed to the increase in the temperature and pH of the silages and the loss of N-NH₃.

With the addition of 15, 30 and 45 % of dehydrated annatto residue, the effluent loss was reduced in relation to the control to 4.40, 2.82 and 1.80 kg t⁻¹ DM, respectively (Table 2). The dehydrated annatto residue was an excellent sequester of *P. purpureum* cv. Roxo moisture, as it has a high amount of dry matter, generating less leaching of nutrients via silage effluent.

The high rates of loss through effluents in silages with lower levels of dehydrated annatto residue are due to the silage's high moisture content, which favours the metabolic activity of yeast and nutrient losses through leaching.

Table 2. Average values of pH, ammonia-N, effluent loss, and dry matter recovery in *P. purpureum* cv. Roxo silages with the inclusion of dehydrated annatto residue

Variables	Levels				Regression equation	CV %	R ²
	0 %	15 %	30 %	45 %			
pH	3.78	3.91	3.94	3.96	$Y = 3.82 + 0.0038x^*$	1.67	0.82
N-NH ₃ ²	3.09	2.58	2.37	2.68	$Y = 2.896 - 0.0096x^*$	5.27	0.37
EL ³	13.64	4.40	2.82	1.80	$Y = 11.23 - 0.2473x^*$	32.79	0.78
RDM ¹	74.75	89.53	90.12	91.08	$Y = 78.93 + 0.3305x^*$	5.08	0.67

*Significant at 5 % probability. 1: Percentage. 2: Percentage in dry matter. 3: kg/ton. CV = coefficient of variation (%).

N-NH₃: ammonia-N, EL: effluent loss, RDM: dry matter recovery.

For every 1 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue included in the *P. purpureum* cv. Roxo silage, there was an increase ($p < 0.05$) of 0.3305 percentage units in dry matter recovery (Table 2). The high dry matter content of the dehydrated annatto residue (81.24 g kg⁻¹, Table 1) efficiently reduced the moisture content of the silage by diluting the amount of water in it.

The dehydrated annatto residue proved to be effective in absorbing moisture from the silage, as it provided a linear increase ($p < 0.05$) in the dry matter (DM) content of *P. purpureum* cv. Roxo silages, estimated at 0.4235 g kg⁻¹ for every 1 g kg⁻¹ included (Table 3).

Furthermore, the use of additives contributes to reducing nutritional deficiencies, increasing the growth of rumen microorganisms, and enhancing microbial fermentation. This leads to greater extraction of forage carbohydrates, increased production of volatile fatty acids, and improved efficiency in the use of metabolizable energy from forage (Santos *et al.*, 2019).

The crude protein (CP) content of *P. purpureum* cv. Roxo silages increased linearly ($p < 0.05$) with the inclusion of dehydrated annatto residue, estimating that for every 1 g kg⁻¹ included, there was an increase in the content of crude protein by 0.1333 percentage units (Table 3).

Regarding the crude protein content, Mertens (1994) point out that 7 g kg⁻¹ of crude protein is sufficient for maintaining the rumen microbiota when there is satisfactory forage consumption due to the protein supply to rumen microorganisms. Considering this, it was possible to reach the 7 % level with the inclusion of 9.37 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue.

The annatto residue presented a value of 12.65 % (Table 1) of crude protein, demonstrating its potential for inclusion as a protein source in animal feed. When used together with *P. purpureum* cv. Roxo (5.96 % of CP), it provides silage with good nutritional values (Table 3).

The addition of dehydrated annatto residue promoted a linear increase ($p < 0.05$) in the neutral detergent fiber (NDF) content, estimated at 0.5347 percentage units (Table 3). The dehydrated annatto residue has a higher NDF content than *P. purpureum* cv. Roxo (75 and 43 g kg⁻¹, respectively, Table 1), justifying the high NDF content in treatments with greater inclusion of the residue. Thus, the progressive increase in NDF content may imply a reduction in dry matter intake due to the physical effect of filling the rumen with excessively fibrous material, reducing the rate of food passage through the digestive tract (Mertens, 1994).

The acid detergent fiber (ADF) content was linearly reduced ($p < 0.05$) by 0.1107 percentage units (Table 3) with the inclusion of dehydrated annatto residue. The data revealed a dilution effect as *P. purpureum* cv. Roxo has an ADF value (30.7 g kg⁻¹) higher than that found in dehydrated annatto residue (24 g kg⁻¹).

The reduction in ADF levels is extremely important as it indicates an increase in the nutritional value of silages since this reduction increases the digestibility of dry matter (Mertens, 1994). Therefore, it can be inferred that the addition of dehydrated annatto residue increases the ruminant's use of some constituents of the silage cell wall.

There was a linear increase ($p < 0.05$) in hemicellulose (HEM) levels of 0.6450 percentage units for each 1 g kg⁻¹ of dehydrated annatto residue added to *P. purpureum* cv. Roxo silage over hemicellulose values (Table 3).

Santos *et al.* (2019) observed an increasing linear behaviour of 0.18 and 0.04 in the NDF and ADF contents, respectively, as the inclusion levels of *Theobroma grandiflorum* (Willd. Ex Spreng.) K Schum. seed cake increased. However, they did not observe a significant effect for the hemicellulose values, that is, there was no influence on the constitution of the cell wall.

Table 3. Chemical composition (average values) of *P. purpureum* cv. Roxo silages with the inclusion of dehydrated annatto residue

Variables	Levels				Regression equation	CV %	R ²
	0 %	15 %	30 %	45 %			
DM ¹	16.74	23.60	31.11	35.45	$Y = 17.18 + 0.4235x^*$	5.24	0.98
CP ²	5.12	8.48	10.23	11.20	$Y = 5.75 + 0.1333x^*$	10.21	0.93
NDF ²	40.55	60.47	62.44	66.62	$Y = 45.48 + 0.5347x^*$	5.71	0.79
ADF ²	28.03	23.44	23.37	22.52	$Y = 26.83 - 0.1107x^*$	5.13	0.73
HEM ²	12.51	37.03	39.07	44.10	$Y = 18.65 + 0.6450x^*$	10.13	0.78

*Significant at 5 % probability. 1: Percentage. 2: Percentage in dry matter. CV = coefficient of variation (%).

DM: dry matter, CP: crude protein, NDF: neutral detergent fiber, ADF: acid detergent fiber, HEM: hemicellulose.

Conclusion

The inclusion of dehydrated annatto residues in elephant grass silage improves the fermentative and nutritional quality by reducing effluent losses and increasing the dry matter and crude protein content of the forage.

References

- Araújo, B. E. A.; Silva, A. G.; Barbosa, D. P.; Santos, I. I. and Guimarães, A. K. V. (2021). Silagem de capim-piatã (*Brachiaria brizantha*) utilizando níveis de resíduo de fibra de Curauá (*Ananas Erectifolius* L.B. Smith). *Conjecturas*, 21(4), 1-16. <https://www.conjecturas.org/index.php/edicoes/article/view/153>
- Barbero, R. P.; Ribeiro, A. C. C.; Moura, A. M.; Longhini, V. Z.; Mattos, T. F. A. and Barbero, M. M. D. (2021). Production potential of beef cattle in tropical pastures: a review. *Ciência Animal Brasileira*, 22, e-69609. <https://doi.org/10.1590/1809-6891v22e-69609>
- Daniel, J. L. P.; Bernardes, T. F.; Jobim, C. C.; Schmidt, P. and Nussio, L. G. (2019). Production and utilization of silages in tropical areas with focus on Brazil. *Grass and Forage Science*, 74(2), 188-200. <https://doi.org/10.1111/gfs.12417>
- Detmann, E.; Souza, M. A.; Valadares Filho, S. C.; Queiroz, A. C.; Berchielli, T.; Saliba, E. O. S.; Cabral, L. S.; Pina, D. S.; Ladeira, M. M. and Azevedo, J. A. G. (2012). *Métodos para análise de alimentos - INCT - Ciência Animal*. Visconde do Rio Branco: Suprema.
- Florentino, J. (2024). Quem são os maiores exportadores de carne bovina do mundo?. <https://globo.rural.globo.com/pecuaria/boi/noticia/2024/01/quem-sao-os-maiores-exportadores-de-carne-bovina-do-mundo.ghtml>
- Garcez, K. F.; Schneider, C. R.; Bragança, L. F.; Fernandes, T.; Neres, M. A.; Krolow, R. H.; Azevedo, E. B. and Castagnara, D. D. (2023). Addition of corn, soybean and rice brens improve the conservation and nutritional value of Tifton 85 silages. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 6(2), 1773-1790. <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n2-066>
- Jobim, C. C.; Nussio, L. G.; Reis, R. A. and Schmidt, P. (2007). Methodological advances in evaluation of preserved forage quality. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36(Suppl), 101-119. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007001000013>
- Mcdonald, P. (1981). *The biochemistry of silage* (p. 218). Chichester: John Wiley and Sons.
- Mertens, D. R. (1994). Regulation of forage intake. In: Fahey Jr., G. C. (Ed.) *Forage quality, evaluation and utilization* (pp. 450-493). Madison: American Society of Agronomy.
- Muck, R. E. (2010). Silage microbiology and its control through additives. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(Suppl.), 183-191. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010001300021>
- Negrão, F. M.; Zanine, A. M.; Silva Filho, A. S.; Silva, A. R.; Santos, R. M.; Caldeira, F. H. B.; Lins, T. O. J. D.; Ciriaco, A. P.; Freiria, L. B. and Reis, R. H. P. (2020). Losses and chemical composition of the silts of piatã grass with inclusion of bean residue. *Research, Society and Development*, 9(7), e900974753. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4753>
- Rêgo, M. M. T.; Neiva, J. N. M.; Cavalcante, M. A. B.; Cândido, M. J. D.; Clementino, R. H. and Restle, J. (2010). Bromatological and fermentative characteristics of elephant grass silages with the addition of annatto by-product. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(9), 1905-1910. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000900007>
- Santos, B. R. C.; Gomes, F. A.; Pinedo, L. A. and Maia, G. F. N. (2019). Elephant grass silage and embaúba with added alternative products in the western amazon. *Nativa*, 7(6), 820-827. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i6.6463>
- Santos, E. F.; Miranda, E. S.; Fonseca, A. R.; Santos, L. R. A.; Pereira, T. B.; Marques, E. C. S.; Lucas, M. F.; Cabral, L. S. and Negrão, F. M. (2024). Losses and chemical composition of marandu grass silage with inclusion of rice bran. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 7(2), e69280. <https://doi.org/10.34188/bjaerv7n2-042>

Detección por RT-LAMP del Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV, *Tobamovirus fructirugosum*) en semillas de tomate en Colombia

RT-LAMP detection of Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV, *Tobamovirus fructirugosum*) in tomato seeds in Colombia

Juan Pablo Bados ^{1,3}, Juliana Sánchez ^{1,4}, Salvatore Davino ^{2,5}, Stefano Panno ^{2,6}, Mauricio Marín ^{1,7}.

¹Laboratorio de Microbiología Industrial, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Colombia. ²Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali (SAAF), Università degli Studi di Palermo, Palermo, Sicilia, Italia. ³✉ jbados@unal.edu.co; ⁴✉ jsanchezy@unal.edu.co; ⁵✉ salvatore.davino@unipa.it; ⁶✉ stefano.panno@unipa.it; ⁷✉ mamarinm@unal.edu.co;



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.114907>

2024 | 73-1 p 55-65 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-06-06 Acep.: 2025-02-05

Resumen

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es uno de los cultivos de mayor importancia mundial, con una producción cercana a 180 Mt/año. En la última década, este cultivo se ha enfrentado al surgimiento del tobamovirus Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV), que se ha dispersado a los cinco continentes a causa de su eficiente transmisión mecánica y por semillas. En este trabajo se evaluó la presencia de este virus en Colombia utilizando RT-LAMP en 15 muestras de semillas de diferentes variedades procedentes de frutos comercializados en supermercados del país. Además, la ocurrencia del ToBRFV se confirmó mediante secuenciación Sanger de amplicones generados por RT-PCR convencional y en tiempo real. Los resultados de las pruebas RT-LAMP indicaron la presencia del ToBRFV en las 15 muestras evaluadas, la cual confirmó su identidad por RT-PCR y secuenciación de los productos de ~200 pb obtenidos con el par de primers F3/B3, así como de productos de ~800 y ~150 pb con los primers Tob-Uni_1/Tob-Uni_2 y ToBrFV_qs1/Tob-Uni_1, respectivamente. Los árboles filogenéticos obtenidos a partir de los análisis de las secuencias agruparon los aislamientos colombianos en el clado general mundial de esta especie viral, con muy altos niveles de identidad (>99 %). Finalmente, las pruebas de RT-qPCR también confirmaron la presencia del ToBRFV, el cual fue el primer registro de este virus en Colombia. Dado el riesgo que presenta la enfermedad causada por ToBRFV sobre los rendimientos y calidad de los frutos de tomate, es necesario que la cadena hortofrutícola del país implemente urgentemente medidas fitosanitarias para su manejo.

Palabras clave: LAMP, RT-PCR, semilla, Solanaceae, tobamovirus.

Abstract

Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) is one of the most important crops in the world, with a production close to 180 mt/year. In the last decade, this crop has faced the emergence of the tobamovirus Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV), which has spread to the five continents thanks to its efficient mechanical and seed transmission. In this work, the presence of this virus in Colombia was evaluated using RT-LAMP in 15 seed samples of different varieties of fruits sold in supermarkets throughout the country. In addition, the occurrence of ToBRFV was confirmed by Sanger sequencing of amplicons generated by conventional and real-time RT-PCR. The results of the RT-LAMP tests indicated the presence of ToBRFV in the 15 evaluated samples, its identity being confirmed by RT-PCR and sequencing of the ~200 bp products obtained with primers F3/B3, as well as products of ~800 and ~150 bp with the primers Tob-Uni_1/Tob-Uni_2 and ToBrFV_qs1/Tob-Uni_1, respectively. Phylogenetic trees obtained from the sequence analysis grouped the Colombian isolates within the general global clade of this viral species, with very high levels of identity (>99 %). Finally, RT-qPCR also confirmed the presence of ToBRFV in the tomato seeds, being the first report of this virus in Colombia. Given the risk that the disease caused by ToBRFV poses to tomato yields and quality, the country's tomato-growing sector must urgently implement phytosanitary measures for its management.

Keywords: LAMP, RT-PCR, seed, Solanaceae, *Tobamovirus*.

Introducción

El tomate (*Solanum lycopersicum* L.) es una de las hortalizas con mayor importancia económica en el mundo, pues se estima que su comercialización alcanza los 93.9 billones de dólares al año y su producción supera los 180 millones de toneladas (FAOSTAT, 2022). En Colombia este cultivo se extiende a 17 667 ha y alcanza una producción anual de 822 818 t; Antioquia es uno de los principales cultivadores, con una participación cercana al 25 % de la producción nacional y un área de 1796 ha (Agronet, 2021).

Es precisamente en el cultivo del tomate donde se ha reportado en el mundo un mayor número de especies de virus de plantas de importancia económica, con al menos 312 especies de 22 familias y 39 géneros (Rivarez et al., 2021). De dichas especies virales 220 presentan genomas de DNA y pertenecen a 3 familias, mientras que 84 especies tienen RNA como genoma y pertenecen a 18 familias; también se registran 8 especies de viroides. A pesar de esto, en Colombia tan solo se han reportado infectando este cultivo cerca de 20 especies de virus de 10 géneros diferentes: *Amalgavirus*, *Alphaendornavirus*, *Tobamovirus*, *Cucumovirus*, *Potyvirus*, *Tospovirus*, *Begomovirus*, *Nepovirus*, *Torradovirus* y *Crinivirus* (Gallo et al., 2020a; 2020b). Entre ellos, los virus con mayor predominancia son: Potato yellow mosaic virus (PYMV, *Begomovirus tuberosi*) (Vaca-Vaca et al., 2012), Tobacco mosaic virus (TMV, *Tobamovirus tabaci*), Tomato mosaic virus (ToMV, *Tobamovirus tomatotessellati*), Cucumber mosaic virus (CMV, *Cucumovirus CMV*), Tomato spotted wilt virus (TSWV, *Orthotospovirus tomatomaculatae*) y Potato virus Y (PVY, *Potyvirus yituberosi*) (Morales et al., 2009; Tamayo y Jaramillo, 2013; Muñoz et al., 2016; 2017). Recientemente, Gallo et al. (2020b) evaluaron la presencia de virus de RNA en cultivos de tomate var. chonto del oriente Antioqueño mediante HTS (*high-throughput sequencing*) y RT-PCR; como resultado encontraron la infección de los virus Potato virus S (PVS, *Carlavirus sigmasolani*), Southern tomato virus (STV, *Amalgavirus lycopersici*), Potato virus Y (PVY), Potato yellow vein virus (PYVV, *Crinivirus flavisolani*) y Potato virus X (PVX, *Potexvirus ecspotati*), en niveles de incidencia de 5.6 %, 72.2 %, 77.8 %, 94.4 % y 100 %, respectivamente, lo que da muestra de una alta diversidad de virus sobre el tomate en dicha región.

En Jordania e Israel, durante los años 2014-2015, se reportó en cultivos de tomate bajo invernadero el surgimiento de una nueva enfermedad de origen viral caracterizada por síntomas como amarillamiento intervenal, mosaico y deformación foliar; necrosis y deformación de brotes y sépalos; decoloración, manchas y necrosis de frutos; y, finalmente, disminución en los rendimientos y en la calidad de los frutos (Salem et al., 2016; Luria et al., 2017; Oladokun et al., 2019). El agente causal de dicha enfermedad fue identificado como un miembro del género *Tobamovirus*

(*Virgaviridae*) y nombrado como Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV, *Tobamovirus fructirugosum*) (Salem et al., 2016), que en la actualidad es reportado en al menos 40 países de los 5 continentes (EPPO, 2024).

Tal como ocurre con otros tobamovirus (es decir, TMV, ToMV), el ToBRFV se dispersa a cortas distancia, principalmente por contacto mecánico, y a largas distancia, por semillas y frutos contaminados (Salem et al., 2023). Aparentemente, el virus no se ubica en el embrión de las semillas, pero sí en la testa, y aunque la tasa de infección a plántulas es muy baja (0.08-2.8 %) (Davino et al., 2020; Salem et al., 2022), resulta suficiente para afectar todo el cultivo, gracias a las prácticas culturales. En este sentido Davino et al. (2020) reportaron en un ensayo bajo invernadero (0.05 ha) que a partir de solo dos plantas inicialmente infectadas con ToBRFV, se alcanzaba en el cultivo el 80 y 100 % de incidencia luego de 4 y 8 meses, respectivamente.

Las partículas virales de ToBRFV tienen forma de varilla rígida con una longitud aproximada de 300 nm y 19 nm de diámetro; un genoma de RNA de cadena sencilla de sentido positivo (ssRNA+) de ~6.4 kb con cuatro ORF (*open reading frames*). Los ORF 1 y 2 codifican para 2 proteínas (126 y 183 kDa, respectivamente) que están relacionadas con la replicación, y que se expresan directamente (ORF1) y por lectura continua (ORF2) de un codón ámbar (UAG) de finalización. El ORF3 codifica para una proteína de movimiento (MP) de 30 kDa y el ORF4 para la cápside (CP) de 17.5 kDa, a partir de la expresión de RNAs subgenómicos (Salem et al., 2016; Zhang et al., 2022). Por otro lado, se ha demostrado que ToBRFV infecta plantas de tomate que poseen genes de resistencia a tobamovirus *Tm-1*, *Tm-2* y el alelo comercial *Tm-2²* (Zinger et al., 2021), debido al no reconocimiento de la MP (Hak y Spiegelman, 2021). Además del tomate, este virus puede infectar al pimentón (*Capsicum annuum* L.) (Fidan et al., 2021).

En evaluaciones sobre plantas indicadoras se ha demostrado infección por el virus en plantas de las familias *Amaranthaceae*, *Apocynaceae*, *Asteraceae* y *Solanaceae*; así como en algunas especies de arvenses de 8 familias botánicas diferentes (*Amaranthaceae*, *Asteraceae*, *Malvaceae*, *Oxalidaceae*, *Portulacaceae*, *Scrophulariaceae*, *Solanaceae* y *Tiliaceae*); aunque solamente en *S. nigrum*, *S. elaeagnifolium*, *S. rostratum* y *Mirabilis jalapa* se presentan síntomas evidentes de clorosis, mosaicos y moteados (Salem et al., 2022; 2023; Matzrafi et al., 2023; Vásquez et al., 2024a). Estudios recientes indican que el rango de hospedantes del ToBRFV alcanza al menos 40 especies vegetales (Vásquez et al., 2025). Así, por ejemplo, Cultrona et al. (2024) demostraron que este virus puede infectar de manera natural a *Convolvulus arvensis* y *Polycarpon tetraphyllum*; mientras que Vásquez et al. (2024a) identificaron y confirmaron mediante pruebas de ELISA que el ToBRFV puede infectar 21 hospedantes diferentes en México, incluidas plantas

de papa. En este último caso, cuando el tejido foliar de papa estuvo en contacto con tomates infectados con ToBRFV, desarrollaron síntomas foliares visuales amarillamientos, deformación y reducción de su tamaño.

Los análisis filogenéticos realizados hasta ahora a partir de genomas completos y/o parciales de aislamientos del ToBRFV, procedentes de diferentes continentes, indican muy altos niveles de identidad (>99 %) entre ellos, y aunque se han encontrado algunos clados separados en los filogramas (es decir, Norte América, Europa), estudios recientes sugieren un origen monofilético para este virus, con Sur América como uno de los candidatos principales, dado que representa el centro de origen de la familia *Solanaceae* (Van de Vossenbergh *et al.*, 2020).

Ya que el ToBRFV se ha reportado en al menos 40 países del mundo (EPPO, 2024), en este estudio se planteó la hipótesis de su posible ocurrencia sobre tomate en Colombia. Para contestar a esta pregunta, se evaluó su presencia directamente sobre semillas de diferentes variedades de tomate obtenidas en frutos cosechados en el país y comercializados en supermercados, utilizando la técnica molecular isotérmica RT-LAMP. Finalmente, se determinó la identidad del virus mediante secuenciación Sanger de amplicones generados por RT-PCR convencional y en tiempo real (RT-qPCR Taqman).

Materiales y métodos

Material vegetal. En supermercados de distribución local y nacional en Colombia, se adquirieron 15 muestras (~0.5 kg/muestra) de frutos de tomate de diferentes variedades: 8 de tomate tipo Cherry (*S. lycopersicum* var. *cerasiforme*; SLT1 a SLT7, SLT11), 3 de tomate tipo chonto (*S. lycopersicum* var. Santa Cruz; SLT12, SLT14, SLT15), 1 de tomate tipo amarillo (*S. lycopersicum* var. amarillo; SLT9), 1 de tomate tipo riñón (*S. lycopersicum* var. Milano; SLT13), 1 de tomate tipo San Marzano (*S. lycopersicum* var. Marzano dell'Agro Sarnese-Nocerino; SLT8), y 1 de tomatillo verde mexicano (*Physalis ixocarpa*; SLT10). Luego se procedió a extraer las semillas de todos los frutos para cada muestra y se dejaron en fermentación por tres días, para lavar con agua destilada, secar a temperatura ambiente (18-25 °C) por un día y proceder a la extracción del RNA.

Extracción de RNA y síntesis de cDNA. Para cada una de las muestras se realizó la extracción del RNA utilizando el kit RNeasy Plant (Qiagen) a partir de 100 mg de semillas, siguiendo las instrucciones del fabricante. La concentración del RNA y su pureza fue evaluada mediante lecturas a 260 nm y 280 nm en un equipo Nanodrop 2000C (Thermo-Fisher Scientific), con lo cual se alcanzaron concentraciones entre 69.8 y 638.3 ng/μL, y relaciones de absorbancia 260:280 nm de 1.8 a 2. El RNA extraído se almacenó a -20 °C hasta su utilización en las pruebas moleculares.

Posteriormente, se realizó la síntesis de cDNA con el primer ToBRFV_qas2 (5' CAGACACAATCTGTTATTAAAGCATC 3') (Menzel y Winter, 2019) en reacciones de 20 μL conteniendo 200 U de la enzima reverso-transcriptasa ExcelRT (SMOBIO), 1X de buffer RT, 0.5 mM de dNTPs, 20 pmol del primer, 20 U de inhibidor de RNasa (RNAok, SMOBIO) y 3 μL de RNA total. Antes de agregar la RT, las reacciones se incubaron en un termociclador T3 (Biometra) a 70 °C por 5 min, luego en hielo por 1 min, y posteriormente se incubaron a 25 °C durante 10 min, 45 °C por 50 min, y finalmente 85 °C por 5 min para inactivar la enzima.

Detección de ToBRFV por RT-LAMP. Las reacciones RT-LAMP se realizaron en un equipo Rotor-Gene Q-5plex HRM (Qiagen) a partir de un volumen final de 12.5 μL, que contenía 0.2 μM de los primers F3 (5' TTGGAGTCTTAGATGTTGCG 3') y B3 (5' GGACACCGTCAACTAGGA 3'); 1.6 μM de los primers FIP (5' CCTTCTCCAACGTG CGCAAGTCACATGC TAGGAAGTACCAC 3') y BIP (5' CCGTGAG TTCTGAGTCAATGGTTGAGGCTCCACATC TCTTAA 3'); 0.4 μM de los primers LF (5' CTCATGC TCATCATAC TCCAA 3') y LB (5' GCTCAGAACACTGAGGAGATT) (Rizzo *et al.*, 2021); 7.5 μL de LAMP Isothermal Master Mix ISO-004 (OptiGene), 1 μL de RNA total (~50 ng/μL) y agua libre de nucleasas (DEPC) hasta alcanzar el volumen final.

Esta evaluación se repitió nuevamente bajo las mismas condiciones, pero en este caso utilizando el cDNA preparado inicialmente para todas las muestras. Las reacciones se realizaron a 65 °C durante 60 min y la fluorescencia se adquirió cada 60 s en el canal verde. Finalmente, se realizó una curva de *melting* mediante la aplicación HRM (*high resolution melting*) del equipo a 95 °C por 1 min, 40 °C por 1 min, 70 °C por 1 min y un aumento de temperatura de 0.5 °C/s hasta alcanzar los 95 °C. En las reacciones se utilizó como control positivo el RNA total de un aislamiento de ToBRFV (ToB-SIC01/19) (Panno *et al.*, 2019) procedente de Sicilia (Italia), y como control negativo (NTC) agua destilada estéril. Con fines informativos, los amplicones de 6 muestras se corrieron en un gel de Agarosa al 1.5 % suplementado con GelRed 1X (Biotium) y se visualizaron en un equipo ChemiDoc MP Imaging System (Bio-Rad).

Confirmación de ToBRFV por RT-PCR y RT-qPCR. Para confirmar la presencia de ToBRFV en Colombia, se realizó su detección en cuatro de las muestras de semillas de tomate mediante One-Step RT-PCR y RT-qPCR con sonda Taqman. Para el primer caso se utilizó el kit SMOBIO [RP1100] ExcelRT en reacciones independientes con los primers B3 y F3 (utilizados también en la prueba de RT-LAMP) que amplifican un fragmento de ~200 pb; con los primers degenerados para tobamovirus Tob-Uni_1 (5' ATTTAAGTGGASGGAAAVCACT 3') y Tob-Uni_2 (5' GTYGTGATGAGTTCRTGGA 3') que amplifican ~800 pb (Letschert *et al.*, 2002), y con los primers

ToBRFV_qs1 (5' CAATCAGAGCACATTTGAAAGTGCA 3') y Tob-Uni_1 que amplifican ~150 pb (Menzel y Winter, 2019). Para el segundo caso se empleó el kit QuantiTect Probe RT-PCR (Qiagen) con los *primers* ToBRFV_qs1 y ToBRFV_qas2 (5' CAGACACAATCTGTTATTTAAGCATC 3') y la sonda ToBRFV_p1 (5' FAM ACAATGGTCCTCTGCACCTG BHQ1_3') que amplifican un fragmento de ~96 pb (Menzel y Winter, 2019). En todas las reacciones de One-Step RT-PCR se siguieron las instrucciones del fabricante y se utilizó el programa: transcripción reversa a 42 °C por 30 min, seguido por una desnaturalización inicial a 94 °C por 3 min, 40 ciclos de 94 °C por 50 s, 52 °C por 50 s, 72 °C por 1 min y una extensión final a 72 °C por 5 min, en un termociclador T3000 (Biometra). Para el RT-qPCR Taqman se utilizó un programa de 42 °C por 30 min, 95 °C por 15 min, 40 ciclos a 94 °C por 15 s y 58 °C por 60 s, con medición de fluorescencia en el canal verde al final de cada ciclo de reacción, utilizando un equipo Rotor-Gene Q-5plex HRM (Qiagen). En todas las reacciones se incluyó un control positivo (RNA de ToBRFV, Sicilia, Italia) y un NTC.

Secuenciación Sanger. Los amplicones obtenidos tanto para One-Step RT-PCR como para RT-qPCR Taqman fueron separados por electroforesis de agarosa y, al menos, 3 de las bandas del tamaño esperado (incluido el control positivo) fueron purificadas del gel con el kit GeneJET Gel Extraction (Thermo-Scientific) para proceder a su secuenciación Sanger en ambos sentidos en un equipo ABI Prism 3730xl de la compañía Macrogen (Corea del Sur). Una vez recibidas las secuencias, se generaron los consensos y se confirmó su naturaleza viral mediante BLASTn¹. Posteriormente, se realizó su alineamiento con el programa MUSCLE (Edgar, 2004) con respecto a secuencias disponibles en GenBank para el ToBRFV y otros tobamovirus (es decir, ToMMV - *Tobamovirus maculatusellati* y ToMV) procedentes de diferentes países. Finalmente, dichos alineamientos fueron empleados para generar matrices de identidad a nivel de nucleótidos y árboles filogenéticos por el método de Neighbor-Joining (Saitou y Nei, 1987) con 1000 réplicas de *bootstrap* utilizando el programa Mega 11.0 (Tamura et al., 2021). Las secuencias obtenidas fueron depositadas en GenBank con los números de acceso PP830526-PP830533 y PP844615- PP844618.

Resultados y discusión

Detección de ToBRFV por RT-LAMP. Utilizando la prueba isotérmica de RT-LAMP, el virus ToBRFV se encontró en las 15 muestras de semillas de tomate evaluadas, independientemente de la variedad; además, se presentó incremento de fluorescencia en el rango de 5 a 16 min, y tiempos de *plateau* inferiores a 30 min (Figura 1(a)). Una vez finalizadas las reacciones, el análisis de HRM permitió identificar

un único pico para todas las muestras, con un valor de Tm ubicado entre 84.01 y 85.84 °C (Figura 1[b]). La muestra del virus procedente de Italia y utilizada como control positivo presentó un Tm de 86.04 °C y un aumento de fluorescencia y *plateau* de 8 y 15 min, respectivamente; mientras que luego de 60 min de reacción no se presentó amplificación en el control negativo (NTC). Con la repetición completa de la prueba, pero a partir de cDNA sintetizado con el primer ToBRFV_qas2, se obtuvieron los mismos resultados en cuanto a la presencia del virus en las 15 muestras evaluadas. Al realizar el corrido electroforético en gel de agarosa de los productos obtenidos por RT-LAMP, se encontró en todas las muestras el patrón de barrido típicamente reportado para esta técnica y denominado como *ladder-like pattern*, pero no en el control negativo (Figura 2).

Para evaluar la naturaleza de los amplicones obtenidos por RT-LAMP, se procedió a realizar una prueba de One-Step RT-PCR utilizando los *primers* B3 y F3, y se obtuvieron amplicones de ~200 pb en las muestras derivadas de semillas de tomate y en el control positivo (Figura 3); su identidad fue confirmada por secuenciación Sanger. El análisis de BLASTn arrojó valores E=9e⁻⁷⁵, 99.36 % de identidad y 100 % de cobertura con respecto a aislamientos de ToBRFV provenientes de Países Bajos (OR760199), Alemania (OQ633221) e Irán (OP557568), entre otros.

Este es el primer registro formal del ToBRFV en muestras de tomate en Colombia y se suma a los reportes previos realizados para este virus en otros países de América, como México (Camacho-Beltrán et al. 2019), Estados Unidos (Ling et al., 2019), Argentina (Obregón et al., 2023) y Perú (Rodríguez-Grados et al., 2024). El resultado obtenido debería llamar la atención de la cadena hortofrutícola del país sobre la necesidad de implementar medidas fitopatológicas que reduzcan la dispersión de este virus a diferentes regiones cultivadoras de tomate. Algunas de las medidas deben incluir procesos de certificación de semilla por su sanidad viral, establecimiento de prácticas culturales que reduzcan la transmisión de virus dentro y entre cultivos, y programas de mejoramiento genético por resistencia a ToBRFV en las variedades más comercializadas en el país (es decir, chonto, cherry, riñón).

Aunque con los datos obtenidos en este estudio no es posible identificar la posible fecha de llegada del ToBRFV a los cultivos de tomate del país, sin duda la comercialización nacional e internacional de semillas que se realiza en tomate juega un papel fundamental para la rápida dispersión de este tobamovirus, lo cual es una conclusión a la que han llegado diferentes estudios independientes (Caruso et al., 2022; Salem et al., 2023). En este sentido, el ToBRFV se ha encontrado en la testa y en los tegumentos externos de las semillas de tomate, pero no en sus embriones (Caruso et al., 2022); de tal manera que, aunque su eficiencia de transmisión es

¹(<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/>).

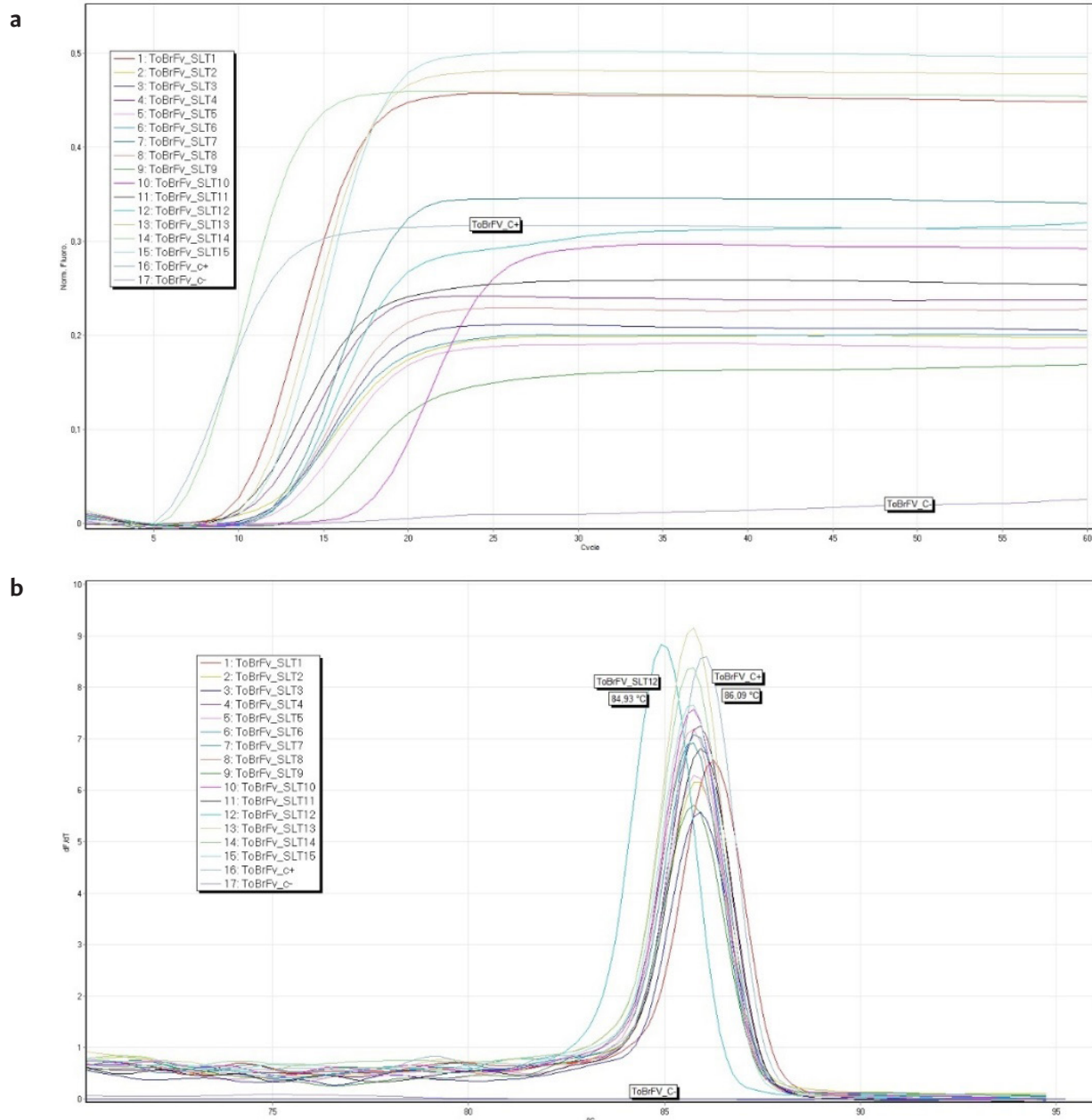


Figura 1. Resultados de detección del virus ToBRFV en semillas de tomate en Colombia mediante RT-LAMP. (a) Curvas de amplificación por RT-LAMP de extractos de RNA. (b) Curvas de desnaturalización obtenidas por HRM. Se indican las temperaturas de *melting* (T_m) para el control positivo (ToBRFV_C+), y para la muestra de semilla con menor valor de T_m (ToBRFV_SLT12), así como el control negativo (ToBRFV_C-).

relativamente baja (<2.8 %), su persistencia es alta en restos vegetales y suelo (Molad *et al.*, 2024; Vázquez *et al.*, 2024a). Se ha demostrado que solo 2 plantas infectadas son suficientes para alcanzar el 100 % de incidencia en cultivos bajo invernadero de tomate, dada la alta transmisión mecánica que presenta este virus (Davino *et al.*, 2020).

De manera similar, al evaluar la transmisión del ToBRFV en 5 variedades de tomate en México cultivadas comercialmente bajo invernadero, se encontró que el virus alcanzó una incidencia del 100 % en tan solo un periodo de 4 meses, lo que se

explicó gracias al progreso logístico de la enfermedad (González-Concha *et al.*, 2021). De esta forma, no resulta sorprendente el hecho de que, aunque el ToBRFV fue reportado inicialmente en México en julio de 2018 en un invernadero de tomate en Ensenada, Baja California (Camacho-Beltrán *et al.*, 2019) y 2 meses después en cultivos de tomate y pimentón de 2 municipios (Yurécuaro y Tanhuato) del estado de Michoacán (Cambrón-Crisantos *et al.*, 2019); para el año 2020, el Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria de México registró este virus sobre tomate y/o pimentón en 79 municipios de 23 Estados de ese país (Senasica, 2020).

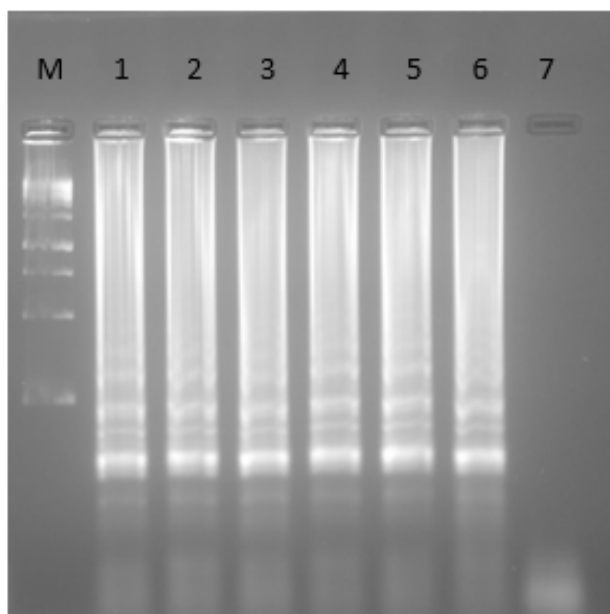


Figura 2. Corrido electroforético en gel de agarosa al 1.5 % de productos de RT-LAMP para el virus ToBRFV en semillas de tomate en Colombia, en el que se muestra un barrido con múltiples amplicones tipo *ladder-like pattern*. M: marcador de peso molecular de 1 kb Thermo Scientific. Líneas 1 a 5 corresponden a las muestras de semilla de tomate SLT1 a SLT5, respectivamente. 6: control positivo (ToBRFV_Italia). 7: control negativo (NTC).

Por otra parte, no se puede desestimar la importancia económica que representa la infección del ToBRFV en cultivos de tomate, pues en el mundo se han reportado por su causa pérdidas de entre el 15-55 % y reducciones del 25-40 % en el peso promedio de los frutos (Salem *et al.*, 2023). Así, por ejemplo, en un estudio realizado en Coahuila (México) con 3 aislamientos de ToBRFV en el híbrido de tomate 172-300, se encontró que en las pruebas con uno de los aislamientos (FQ3) se alcanzó una disminución del 53.9 % y 38.9 % en la altura y peso seco aéreo de las plantas, respectivamente; mientras que se redujo el rendimiento en comparación con el tratamiento control en 43.2 % (Vásquez *et al.*, 2024b). Adicionalmente, la presencia del virus afecta dramáticamente las características cosméticas y organolépticas de los frutos (Caruso *et al.*, 2022; Salem *et al.*, 2023) y la posibilidad de obtener semillas por parte de los agricultores para futuras siembras, una práctica común en países en desarrollo como Colombia.

Para nuestro conocimiento, el uso de la técnica de RT-LAMP realizada en este estudio, corresponde al primer registro del empleo de esta metodología en el campo de virología vegetal en el país, mientras que su utilización en laboratorios colombianos para la detección de virus humanos solo se ha reportado para SARS-CoV-2 (Londoño-Avendaño *et al.*, 2022), y en estudios realizados en el extranjero que utilizaron algunos aislamientos de origen colombiano de los virus: Classical swine fever virus (CSFV, *Pestivirus*

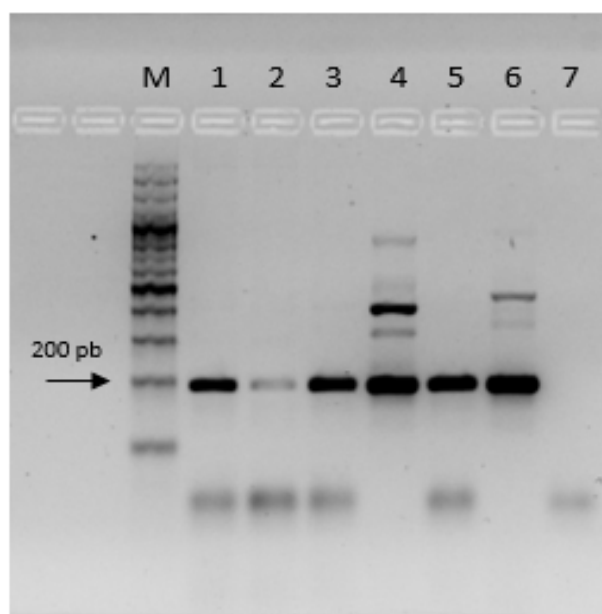


Figura 3. Corrido electroforético en gel de agarosa al 1.5 % de productos de RT-PCR con los primers B3 y F3 para la identificación del virus ToBRFV en semillas de tomate en Colombia. M: marcador de peso molecular de 100 pb Thermo Scientific. Líneas 1 a 5 corresponden a las muestras de semilla de tomate SLT1 a SLT5, respectivamente. 6: control positivo (ToBRFV_Italia). 7: control negativo (NTC).

suis) y Yellow fever virus (YFV, *Orthoflavivirus flavi*) (Nunes *et al.*, 2015; Bohórquez *et al.*, 2024), entre otros. La técnica de LAMP ofrece una oportunidad única para la detección de virus en tiempo real tanto en campo como en laboratorio, dada la posibilidad de realizar lecturas de resultados mediante detección colorimétrica (es decir, inspección visual) y/o fluorimétrica (esto es, equipos de qPCR, Genie®) (Panno *et al.*, 2020; Caruso *et al.*, 2023; Bohórquez *et al.*, 2024).

En el caso particular de virus de plantas, la técnica de LAMP es altamente sensible, específica y, además, puede ser utilizada a partir de extractos crudos o parcialmente clarificados, gracias a la reducida sensibilidad de la polimerasa Bst (*Geobacillus stearothermophilus*) a los inhibidores frecuentemente presentes en los tejidos vegetales, como fenoles y polisacáridos de alto peso molecular (Panno *et al.*, 2020; Caruso *et al.*, 2023). Adicionalmente, en caso de ser necesario, es posible secuenciar los amplicones generados con los primers B3 y F3 para confirmar su naturaleza viral, tal como se realizó en esta investigación.

Confirmación de ToBRFV por RT-PCR y RT-qPCR.

Las amplificaciones con One-Step RT-PCR permitieron obtener los productos del tamaño esperado para las combinaciones Tob-Uni_1 /Tob-uni_2 (~800 pb) y Tob-Uni_1/ToBrFV_qs1 (~150 pb) (Figura 4). El análisis de BLASTn de las secuencias Sanger confirmó la identidad de los amplicones, al obtenerse valores para la banda de 150 pb de $E=2e^{-50}$, 100 % de identidad y

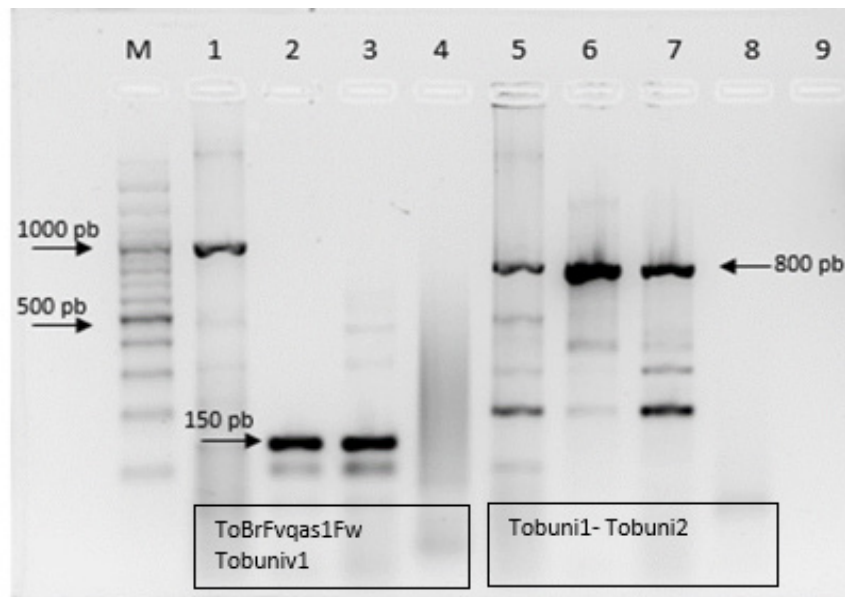


Figura 4. Corrido electroforético en gel de agarosa al 1.5 % de productos de RT-PCR con los primers ToBrFV_qs1/Tob-Uni_1 (líneas 1 a 4) y Tob-Uni_1/Tob-Uni_2 (líneas 5 a 8) para la identificación del virus ToBRFV en semillas de tomate en Colombia. M: marcador de peso molecular de 100 pb. 1: SLT5. 2: SLT14. 3: control positivo (ToBRFV_Italia). 4: control negativo (NTC). 5: SLT5. 6: SLT14. 7: control positivo (ToBRFV_Italia). 8: control negativo (NTC).

100 % de cobertura, con respecto a aislamientos de ToBRFV de Israel (PP681638), Alemania (OQ633222) y China (OR792460), entre otros países. Para la banda de ~800 pb, el valor E fue de 0, el porcentaje de identidad del 99.6 % y la cobertura del 99 %, con respecto a aislamientos del virus de Turquía (MT118666), Países Bajos (MN882063) y Alemania (OR843983), entre otros.

Finalmente, las pruebas de RT-qPCR con los primers ToBrFVqs1-ToBrFVqs2 y la sonda ToBrFVp1 resultaron en amplificaciones positivas para las 4 muestras de semilla evaluadas y para el control positivo, con valores de Ct (*threshold cycle*) de 4.5 a 25.2 (Figura 5[a]); también se confirmó el tamaño de los amplicones de 96 pb mediante electroforesis (Figura 5[b]) y su naturaleza viral por secuenciación Sanger. Este resultado demuestra el gran potencial de esta técnica para su utilización en estudios epidemiológicos del ToBRFV en Colombia, y, en conjunto con las técnicas de RT-LAMP y One-Step RT-PCR, ofrecen al sector hortofrutícola del país un portafolio de herramientas de detección altamente sensibles y específicas para el diagnóstico de este virus en diferentes escenarios fitopatológicos, como la certificación de semilla, los estudios de asociación de síntomas y pérdidas económicas, el mejoramiento genético, etc. En este sentido será de gran interés realizar evaluaciones de incidencia y prevalencia de ToBRFV en diferentes departamentos cultivadores de tomate del país y en diversas épocas del año, tanto a nivel de plantas en producción, como de plántulas y semillas comercializadas por viveros y compañías de insumos agrícolas, de manera que se tenga un mejor panorama del estado actual de la enfermedad causada por este virus en Colombia.

Análisis filogenéticos. Utilizando las secuencias derivadas de los amplicones obtenidos con los pares de primers B3/F3 y Tob-Uni_1/Tob-Uni_2, se realizó un análisis filogenético, en el que se encontró que las secuencias de ToBRFV derivadas de semillas de tomate de Colombia se ubicaron en un único clado mundial soportado por un valor de *Bootstrap* del 100 %, que incluye secuencias de aislamientos de este virus procedentes de diferentes continentes y que claramente se diferencian de otros tobamovirus reportados en tomate, como ToMMV y ToMV (Figura 6). Resultados similares se han encontrado en múltiples estudios que buscaron evaluar la diversidad genética de este virus y sus relaciones filogenéticas con otros tobamovirus (Oladokun *et al.*, 2019; Van de Vossen *et al.*, 2020; Caruso *et al.*, 2022).

En este sentido, se han planteado diferentes hipótesis sobre la emergencia del ToBRFV; una de ellas indica que el virus pudo surgir como resultado de la recombinación entre tobamovirus, específicamente TMV y ToMMV (Salem *et al.*, 2016; Maayan *et al.*, 2018). El hecho de que se encuentren tan bajos niveles de variación en diferentes regiones del genoma entre aislamientos del ToBRFV procedentes de múltiples países (usualmente <1 %) (Chanda *et al.*, 2020; Caruso *et al.*, 2022) sugieren su origen reciente a partir de un único ancestro común y una muy eficiente dispersión vía semilla sexual y transmisión mecánica. Sobre este último aspecto, se ha demostrado que los viriones de los tobamovirus presentan una muy alta estabilidad en el ambiente, e incluso pueden persistir por largos periodos en el agua de riego, en drenajes, en el suelo, en residuos vegetales y sobre diferentes superficies artificiales y naturales (Li *et al.*, 2016; Wilstermann y Ziebell, 2019; Caruso *et al.*, 2022; Vásquez *et al.*, 2024a).

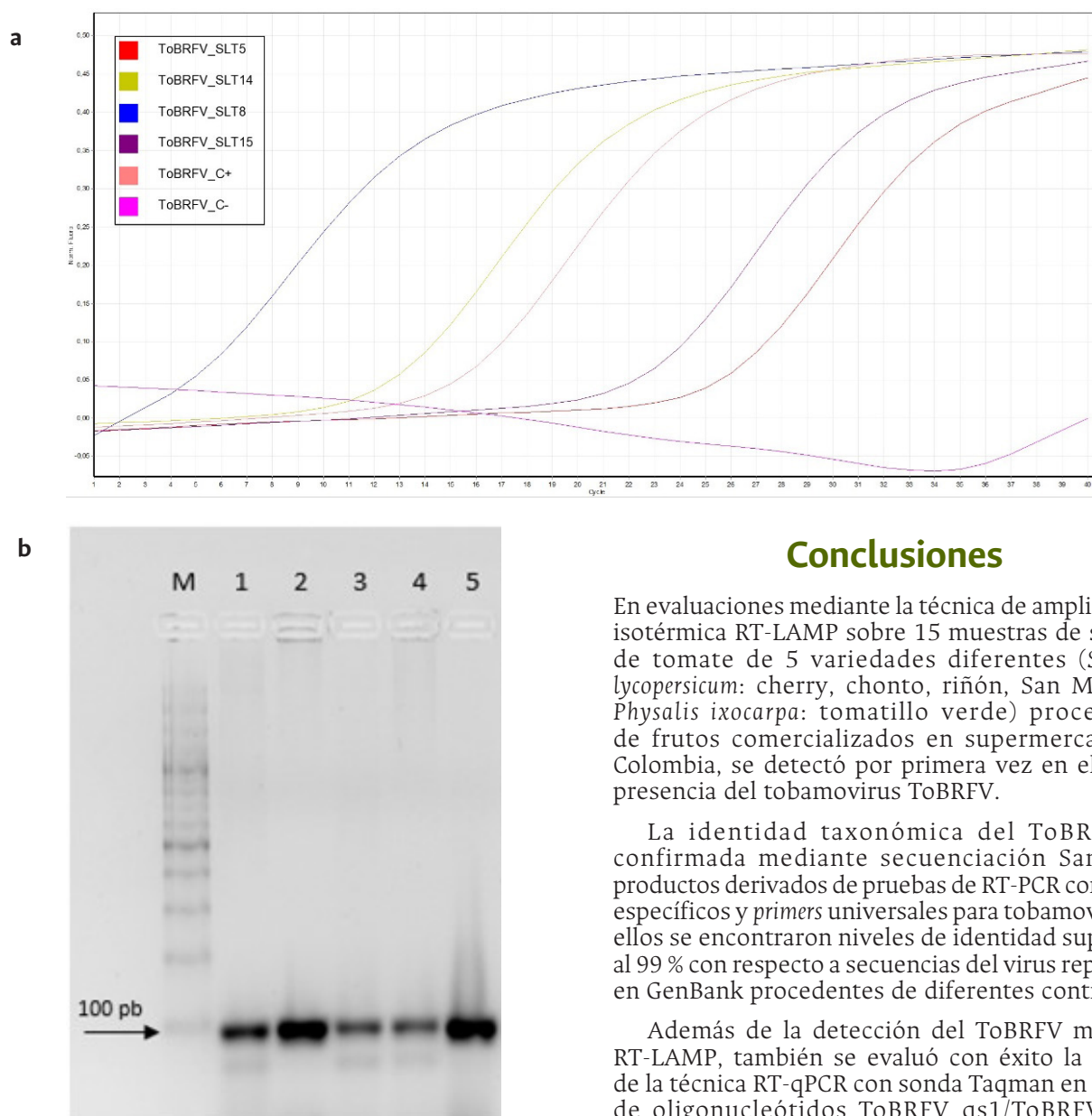


Figura 5. Resultados de detección del virus ToBRFV en semillas de tomate en Colombia mediante RT-qPCR Taqman. (a) Curvas de amplificación a partir de extractos de RNA de semillas de tomate en Colombia. (b) Corrido electroforético en gel de agarosa al 2 % de productos de RT-qPCR Taqman. M: marcador de peso molecular de 100 pb Thermo Scientific. Líneas 1 a 5: corresponden a las muestras de semilla de tomate SLT1 a SLT5, respectivamente.

La identificación del ToBRFV en las 15 muestras de semillas de tomate, obtenidas de diferentes supermercados de alcance local y nacional, demuestran la amplia circulación de este virus en el país y llaman la atención sobre la necesidad apremiante de establecer programas cuarentenarios, de mejoramiento genético, de certificación de semilla y de capacitación a los agricultores de tomate sobre este nuevo patógeno viral, de manera que se reduzca el impacto potencial de la enfermedad que este causa en la cadena hortofrutícola de Colombia.

Conclusiones

En evaluaciones mediante la técnica de amplificación isotérmica RT-LAMP sobre 15 muestras de semillas de tomate de 5 variedades diferentes (*Solanum lycopersicum*: cherry, chonto, riñón, San Marzano; *Physalis ixocarpa*: tomatillo verde) procedentes de frutos comercializados en supermercados de Colombia, se detectó por primera vez en el país la presencia del tobamovirus ToBRFV.

La identidad taxonómica del ToBRFV fue confirmada mediante secuenciación Sanger de productos derivados de pruebas de RT-PCR con *primers* específicos y *primers* universales para tobamovirus; en ellos se encontraron niveles de identidad superiores al 99 % con respecto a secuencias del virus reportadas en GenBank procedentes de diferentes continentes.

Además de la detección del ToBRFV mediante RT-LAMP, también se evaluó con éxito la utilidad de la técnica RT-qPCR con sonda Taqman en el juego de oligonucleótidos ToBRFV_qs1/ToBRFV_qas2/ToBRFV_p1. Estos resultados ofrecen a la cadena hortofrutícola del país un portafolio de herramientas moleculares para el diagnóstico de los aislamientos de este virus.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín a través del proyecto: Identificación molecular de virus que infectan cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum*) (código Hermes: 58518). Se agradece a los integrantes del Laboratorio de Microbiología Industrial por su apoyo con la colección de las muestras de frutos de tomate y a los miembros del Laboratorio de Virología Vegetal Bruno Rosciglione de la Universidad de Palermo (Italia) por su asesoría en la técnica de RT-LAMP.

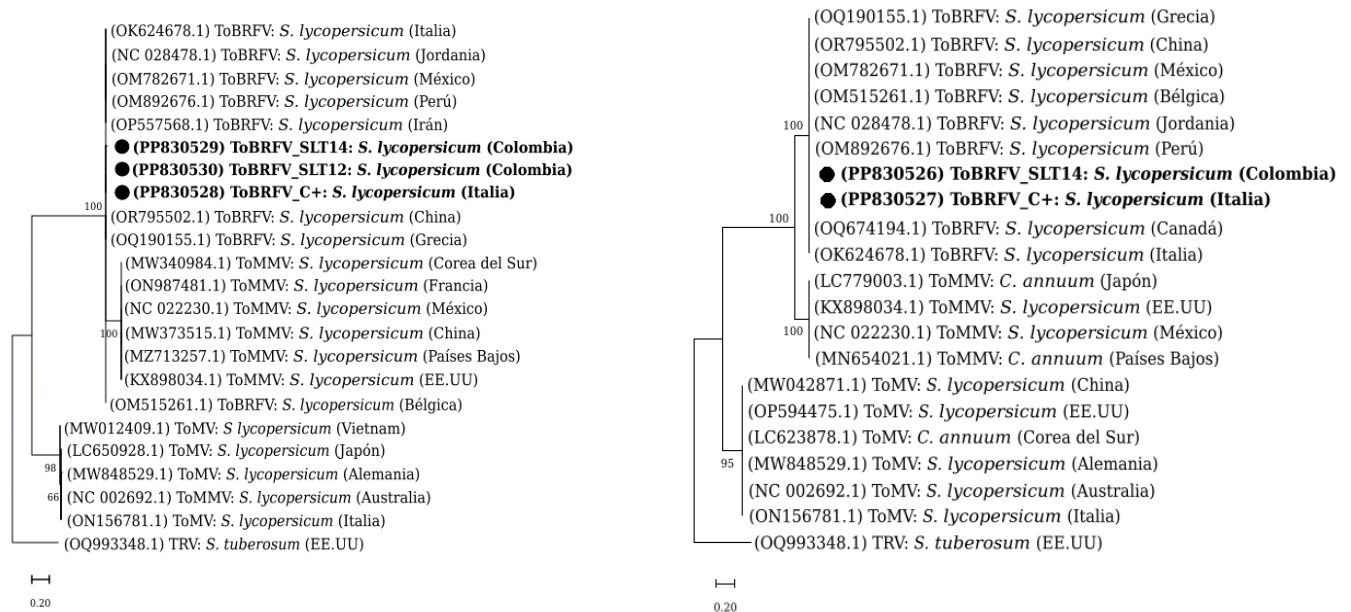


Figura 6. Árboles filogenéticos obtenidos a partir de secuencias de ToBRFV de Colombia y otros países. (a) Árbol construido a partir de secuencias derivadas de amplicones con los primers B3-F3. (b) Árbol construido a partir de secuencias derivadas de amplicones con los primers Tob-Uni_1/Tob-Uni_2. Con fines comparativos se incluyeron secuencias de ToMMV y ToMV. Una secuencia del Tobacco rattle virus (TRV, *Tobravirus tabaci*) se utilizó como grupo externo para el enraizamiento de los árboles. Los números sobre las ramas indican los valores de bootstrap.

Referencias

- Agronet. (2021). Red de información y comunicación del sector Agropecuario Colombiano. Reporte: Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>
- Bohórquez, J. A.; Muñoz-Aguilera, A.; Lanka, S.; Coronado, L.; Rosell, R.; Alberch, M.; Maddox, C.W. y Ganges, L. (2024). Development of a new loop-mediated isothermal amplification test for the sensitive, rapid, and economic detection of different genotypes of Classical swine fever virus. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 14, 1372166. <https://doi.org/10.3389/fcimb.2024.1372166>
- Camacho-Beltrán, E.; Pérez-Villarreal, A.; Leyva-López, N. E.; Rodríguez-Negrete, E. A.; Cenicer-Ojeda, E. A. y Méndez-Lozano, J. (2019). Occurrence of Tomato brown rugose fruit virus infecting tomato crops in Mexico. *Plant Disease*, 103, 1440. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-18-1974-PDN>
- Cambrón-Crisantos, J.; Rodríguez-Mendoza, J.; Valencia-Luna, J.; Alcasio, R.; García-Ávila, C.; López-Buenfil, J. y Ochoa-Martínez, D. (2019). First report of Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV) in Michoacan, Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 37(1), 185-192. https://www.researchgate.net/publication/329563542_First_report_of_Tomato_brown_rugose_fruit_virus_ToBRFV_in_Michoacan_Mexico
- Caruso, A. G.; Bertacca, S.; Parrella, G.; Rizzo, R.; Davino, S. y Panno, S. (2022). Tomato brown rugose fruit virus: A pathogen that is changing the tomato production worldwide. *Annals of Applied Biology*, 181(3), 258-274. <https://doi.org/10.1111/aab.12788>
- Caruso, A. G.; Ragona, A.; Bertacca, S.; Montoya, M.; Panno, S. y Davino, S. (2023). Development of an in-field real-time LAMP assay for rapid detection of Tomato leaf curl New Delhi virus. *Plants*, 12(7), 1487. <https://doi.org/10.3390/plants12071487>
- Chanda, B.; Rivera, Y.; Nunziata, S. O.; Gálvez, M. E., Gilliard, A. y Ling, K. S. (2020). Complete genome sequence of a Tomato brown rugose fruit virus isolated in the United States. *Microbiology Resource Announcements*, 9(29), e00630-20. <https://doi.org/10.1128/MRA.00630-20>
- Cultrona, M.; Bonini, N.; Pacifico, D. y Tessitori, M. (2024). First report of *Convolvulus arvensis* and *Polycarpon tetraphyllum* as natural hosts of Tomato brown rugose fruit virus. *Plant Disease*, 108, 827. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-23-2413-PDN>
- Davino, S.; Caruso, A. G.; Bertacca, S.; Barone, S. y Panno, S. (2020). Tomato brown rugose fruit virus: Seed transmission rate and efficacy of different seed disinfection treatments. *Plants*, 9(11), 1615. <https://doi.org/10.3390/plants9111615>
- Edgar, R. C.; Drive, R. M. y Valley, M. (2004). Muscle: Multiple sequence alignment with high accuracy and high throughput. *Nucleic Acids Research*, 32, 1792-1797. <https://doi.org/10.1093/nar/gkh340>
- EPPO. (2024). EPPO Global Database. Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV). <https://gd.eppo.int/taxon/TOBRFV>
- FAOSTAT. (2022). Food and agriculture data. Database (Food and Agriculture Organization Statistics). <https://www.fao.org/faostat/en/#home>
- Fidan, H.; Sarikaya, P.; Yildiz, K.; Topkaya, B.; Erkis, G. y Calis, O. (2021). Robust molecular detection of the new Tomato brown rugose fruit virus in infected tomato and pepper plants from Turkey. *Journal of Integrative Agriculture*, 20(8), 2170-2179. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63335-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63335-4)
- Gallo, Y.; Gutiérrez, P. A. y Marín, M. (2020a). Identificación de virus de RNA en cultivos de tomate del oriente de Antioquia (Colombia) por secuenciación de nueva generación (NGS). *Revista U.D.C.A. Actualidad y Divulgación Científica*, 23(1), e1414. <http://doi.org/10.31910/rudca.v23.n1.2020.1414>
- Gallo, Y.; Muñoz, L.; Toro, L.; Gutiérrez, P. A. y Marín, M. (2020b). Detección de virus de ARN en cultivos de tomate del oriente Antioqueño mediante secuenciación de alto rendimiento y

- RT-qPCR. *Bioagro*, 32(3), 147-158. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7901975>
- González-Concha, L. F.; Ramírez-Gil, J. G.; García-Estrada, R. S.; Rebolgar-Alviter, Á. y Tovar-Pedraza, J. M. (2021). Spatiotemporal analyses of Tomato brown rugose fruit virus in commercial tomato greenhouses. *Agronomy*, 11(7), 1268. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071268>
- Hak, H. y Spiegelman, Z. (2021). The Tomato brown rugose fruit virus movement protein overcomes Tm-2² resistance in tomato while attenuating viral transport. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 34(9), 1024-1032 <https://doi.org/10.1094/MPMI-01-21-0023-R>
- Letschert, B.; Adam, G.; Lesemann, D.; Willingmann, P. y Heinze, C. (2002). Detection and differentiation of serologically cross-reacting tobamoviruses of economical importance by RT-PCR and RT-PCR-RFLP. *Journal of Virological Methods*, 106(1), 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0166-0934\(02\)00135-0](https://doi.org/10.1016/S0166-0934(02)00135-0)
- Li, J. X.; Liu, S. S. y Gu, Q. S. (2016). Transmission efficiency of Cucumber green mottle mosaic virus via seeds, soil, pruning and irrigation water. *Journal of Phytopathology*, 164(5), 300-309. <https://doi.org/10.1111/jph.12457>
- Ling, K. S.; Tian, T.; Gurung, S.; Salati, R. y Gilliard, A. (2019). First report of tomato brown rugose fruit virus infecting greenhouse tomato in the United States. *Plant Disease*, 103(6), 1439. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-18-1959-PDN>
- Londoño-Avenida, M. A.; Libreros, G.; Osorio, L. y Parra, B. (2022). A rapid RT-LAMP assay for SARS-CoV-2 with colorimetric detection assisted by a mobile application. *Diagnostics*, 12(2), 848. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12040848>
- Luria, N.; Smith, E.; Reingold, V.; Bekelman, I.; Lapidot, M.; Levin, I.; Elad, N.; Tam, Y.; Sela, N.; Abu-Ras, A.; Ezra, N.; Haberman, A.; Yitzhak, L.; Lachman, O. y Dombrovsky, A. (2017). A new Tobamovirus isolate infects tomato plants harboring Tm-22 resistance genes. *PLoS One*, 12(1), e0170429. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0170429>
- Maayan, Y.; Pandaranayaka, E. P.; Srivastava, D. A.; Lapidot, M.; Levin, I.; Dombrovsky, A. y Harel, A. (2018). Using genomic analysis to identify tomato Tm-2 resistance-breaking mutations and their underlying evolutionary path in a new and emerging Tobamovirus. *Archives of Virology*, 163(7), 1863-1875. <https://doi.org/10.1007/s00705-018-3819-5>
- Matzrafi, M.; Abu-Nassar, J.; Klap, C.; Shtarkman, M.; Smith, E. y Dombrovsky, A. (2023). *Solanum elaeagnifolium* and *S. rostratum* as potential hosts of the Tomato brown rugose fruit virus. *PLoS ONE*, 18(3), e0282441. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0282441>
- Menzel, W. y Winter, S. (2019). Identification of novel and known tobamoviruses in tomato and other solanaceous crops using a new pair of generic primers and development of a specific RT-qPCR for ToBRFV. En VI International Symposium on Tomato Diseases: Managing Tomato Diseases in the Face of Globalization and Climate Change 1316, pp. 143-148. <https://doi.org/10.17660/ActaHort.2021.1316.20>
- Molad, O.; Smith, E.; Luria, N.; Bakelman, E.; Lachman, O.; Reches, M. y Dombrovsky, A. (2024). Studying Tomato brown rugose fruit virus longevity in soil and virion susceptibility to pH treatments helped improve virus control by soil disinfection. *Plant Soil*, 505, 543-558. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06690-y>
- Morales, F.; Tamayo, P.; Castaño, M.; Olaya, C.; Martínez, A. y Velasco, A. (2009). Enfermedades virales del tomate (*Solanum lycopersicum*) en Colombia. *Fitopatología Colombiana*, 33, 23-27. <https://www.researchgate.net/publication/267510524>
- Muñoz-Baena, L.; Gutiérrez-Sánchez, P. y Marín-Montoya, M. (2016). Detección y secuenciación del genoma del Potato virus Y (PVY) que infecta plantas de tomate en Antioquia, Colombia. *Bioagro*, 28(2), 69-80. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5509124>
- Muñoz-Baena, L.; Gutiérrez-Sánchez, P. y Marín-Montoya, M. 2017. Secuenciación del genoma completo del Potato yellow vein virus (PVV) en tomate (*Solanum lycopersicum*) en Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 22(1), 5-17. <https://doi.org/10.15446/abc.v22n1.59211>
- Nunes, M. R.; Vianez, J. L.; Nunes, K. N.; Da Silva, S. P.; Lima, C. P.; Guzmán, H.; Martins, L. C.; Carvalho, V. L.; Tesh, R. B. y Vasconcelos, P.F. (2015). Analysis of a reverse transcription loop-mediated isothermal amplification (RT-LAMP) for yellow fever diagnostic. *Journal of Virological Methods*, 226, 40-51 <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2015.10.003>
- Obregón, V. G.; Ibáñez, J. M.; Lattar, T. E.; Juszczak, S. y Groth-Helms, D. (2023). First report of Tomato brown rugose fruit virus in tomato in Argentina. *New Disease Reports*, 48, e12203. <https://doi.org/10.1002/ndr.2.12203>
- Oladokun, J. O.; Halabi, M. H.; Barua, P. y Nath, P. D. (2019). Tomato brown rugose fruit disease: Current distribution, knowledge and future prospects. *Plant Pathology*, 68(9), 1579-1586. <https://bsppjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/ppa.13096>
- Panno, S.; Ruiz-Ruiz, S.; Caruso, A. G.; Alfaro-Fernández, A.; San Ambrosio, M. I. F., y Davino, S. (2019). Real-time reverse transcription polymerase chain reaction development for rapid detection of Tomato brown rugose fruit virus and comparison with other techniques. *PeerJ*, 7, e7928. <https://doi.org/10.1111/ppa.13096>
- Panno, S.; Matić, S.; Tiberini, A.; Caruso, A. G.; Bella, P.; Torta, L.; Stassi, R. y Davino, A. S. (2020). Loop mediated isothermal amplification: Principles and applications in plant virology. *Plants*, 9(4), 461. <https://doi.org/10.3390/plants9040461>
- Rizzo, D.; Da Lio, D.; Panattoni, A.; Salemi, C.; Cappellini, G.; Bartolini, L. y Parrella, G. (2021). Rapid and sensitive detection of Tomato brown rugose fruit virus in tomato and pepper seeds by reverse transcription loop-mediated isothermal amplification assays (real time and visual) and comparison with RT-PCR end-point and RT-qPCR methods. *Frontiers in Microbiology*, 12, 640932. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.640932>
- Rodríguez-Grados, P.; Saldaña, C.; Estrada, R.; Salazar, W.; Contreras-Liza, S. y Arbizu, C. 2024. Presence of tomato brown rugose fruit virus (ToBRV) in tomatoes from the Southern Peruvian Coast. En Proceedings of the 3rd International Electronic Conference on Plant Sciences, 15-17 de enero de 2024. Basilea: MDPI.
- Saitou, N. y Nei, M. (1987). The neighbor-joining method: A new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, 4(4), 406-425. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.molbev.a040454>
- Salem, N.; Mansour, A.; Ciuffo, M.; Falk, B. W. y Turina, M. (2016). A new Tobamovirus infecting tomato crops in Jordan. *Archives of Virology*, 161(2), 503-506. <https://doi.org/10.1007/s00705-015-2677-7>
- Salem, N. M.; Sulaiman, A.; Samarah, N.; Turina, M. y Vallino, M. (2022). Localization and mechanical transmission of Tomato brown rugose fruit virus in tomato seeds. *Plant Disease*, 106, 275-281. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-20-2413-RE>
- Salem, N. M.; Jewehan, A.; Aranda, M. A. y Fox, A. (2023). Tomato brown rugose fruit virus pandemic. *Annual Review of*

- Phytopathology, 61, 137-164. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-021622-120703>
- Senasica. (2020). Panorama nacional del virus del fruto rugoso café del tomate (ToBRFV). https://dj.senasica.gob.mx/Contenido/files/2020/abril/PANToBRFV_bc6c0958-dc49-4fb5-ac21-355322898f15.pdf
- Rivarez, M. P. S.; Vučurović, A.; Mehle, N.; Ravnikar, M. y Kutnjak, D. (2021). Global advances in tomato virome research: Current status and the impact of high-throughput sequencing. *Frontiers in Microbiology*, 12, 671925. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.671925>
- Tamayo, P. y Jaramillo, P. (2013). *Enfermedades del tomate, pimentón, ají y berenjena en Colombia. Guía para su diagnóstico y manejo*. Rionegro: Corpoica.
- Tamura, K.; Stecher, G. y Kumar, S. (2021). MEGA11: Molecular evolutionary genetics analysis version 11. *Molecular biology and evolution*, 38(7), 3022-3027. <https://doi.org/10.1093/molbev/msab120>
- Vaca-Vaca, J. C.; Betancur-Pérez, J. F. y López-López, K. (2012). Distribución y diversidad genética de *Begomovirus* que infectan tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en Colombia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 60-76. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/31764>
- Van de Vossenbergh, B. T.; Visser, M.; Bruinsma, M.; Koenraadt, H. M.; Westenberg, M. y Botermans, M. (2020). Real-time tracking of Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV) outbreaks in the Netherlands using Nextstrain. *PLoS One*, 15(10), e0234671. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234671>
- Vásquez, U.; López, H.; Frías, G. A.; Delgado, J. C.; Flores, A.; Aguirre, L. A. y Hernández, A. (2024a). Biological exploration and physicochemical characteristics of Tomato brown rugose fruit virus in several host crops. *Agronomy*, 14(2), 388. <https://doi.org/10.3390/agronomy14020388>
- Vásquez, U.; Frías-Treviño, G. A.; López-López, H.; Delgado-Ortiz, J. C.; Aguirre-Uribe, L. A. y Flores-Olivas, A. (2024b). Evaluation of the pathogenicity of three isolates of tomato brown rugose fruit virus in tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) from Coahuila, Mexico. *Revista Bio Ciencias*, 11, e1576. <https://doi.org/10.15741/revbio.11.e1576>
- Vásquez, G. U.; Delgado-Ortiz, J. C.; Frías-Treviño, G. A.; Aguirre-Uribe, L. A. y Flores-Olivas, A. (2025). *Tobamovirus fructirugosum* an emerging disease: Review and current situation in Mexico. *Mexican Journal of Phytopathology*, 43(1), 34. <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2401-7>
- Wilstermann, A. y Ziebell, H. (2019). Tomato brown rugose fruit virus (ToBRFV). *JKI Data Sheets-Plant Disease Diagnostics*, 1, 1-4. <https://doi.org/10.5073/20190607-160917>
- Zhang, S.; Griffiths, J. S.; Marchand, G.; Bernards, M. A. y Wang, A. (2022). Tomato brown rugose fruit virus: An emerging and rapidly spreading plant RNA virus that threatens tomato production worldwide. *Molecular Plant Pathology*, 23(9), 1262-1277. <https://doi.org/10.1111/mp.13229>
- Zinger, A.; Lapidot, M.; Harel, A.; Doron-Faigenboim, A.; Gelbart, D. y Levin, I. (2021). Identification and mapping of tomato genome loci controlling tolerance and resistance to Tomato brown rugose fruit virus. *Plants*, 10(1), 179. <https://doi.org/10.3390/plants10010179>

Prospective analysis of the agricultural trade relations between Peru and India from 2019 to 2023 before the free trade agreement

Análisis prospectivo de las relaciones comerciales agrícolas entre Perú e India de 2019 a 2023 antes del tratado de libre comercio

Alberto Luis Pantaleón Santamaría ^{1,6}, José Carlos Montes Ninaquispe ^{2,7}, Richard Ignacio Montes Tocto ^{3,8}, Billy Heinrich Maco Elera ^{4,9}, Ingrid Isabel Medina Cardozo ^{5,10}, Halina Razuri Rubio ^{5,11}.

¹Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú. ²Universidad de San Martín de Porres. Santa Anita, Perú. ³Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Chiclayo, Perú. ⁴Universidad Nacional de Cajamarca. Cajamarca, Perú. ⁵Universidad César Vallejo. Trujillo, Perú. ⁶✉ C17084@utp.edu.pe; ⁷✉ jmontesn@usmp.pe; ⁸✉ rmontes@usat.edu.pe; ⁹✉ bmacao@unc.edu.pe; ¹⁰✉ mcardozou@ucvvirtual.edu.pe; ¹¹✉ hrazuri@ucvvirtual.edu.pe



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.115375>

2024 | 73-1 p 66-72 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-06-27 Acep.: 2025-02-05

Abstract

The primary objective of this research was to analyze the agricultural trade relations between Peru and India from 2019 to 2023. A quantitative methodology was employed, with a descriptive scope and a non-experimental design, using data from SUNAT and INFOTRADE (PROMPERÚ). The results indicate that the trade intensity index (TII) of Peruvian agricultural exports to India declined by 40 % in 2020 and 41 % in 2021 but rebounded in 2022 and 2023 with increases of 132 % and 8 %, respectively, resulting in an average annual growth rate of 15 %. Likewise, agricultural imports from India increased by 55 % in 2020, dropped by 47 % in 2021, grew by 34 % in 2022, and declined by 13 % in 2023, with an average annual growth rate of 7 %. Among exported products, blueberries, which had no recorded exports in 2019, reached \$ 1,58 million USD in 2023, accounting for 27,39 % of total exports. Powdered tara increased from \$ 597 000 USD in 2019 to \$ 960 000 USD in 2022 but declined by 79,79 % in 2023. It is concluded that, despite growth in certain products, logistical and tariff barriers continue to constrain bilateral trade. It is recommended to expedite negotiations for a free trade agreement and enhance trade infrastructure.

Keywords: Agricultural trade, blueberries, logistical barriers, free trade agreement, Peruvian exports, trade intensity index.

Resumen

El objetivo principal de esta investigación fue analizar las relaciones de intercambio comercial agrícola entre Perú e India entre 2019 y 2023. Se utilizó una metodología cuantitativa, con un alcance descriptivo y un diseño no experimental, empleando datos de SUNAT e INFOTRADE (PROMPERÚ). Los resultados muestran que el índice de intensidad comercial (IIC) de las exportaciones agrícolas peruanas a India cayó un 40 % en 2020 y un 41 % en 2021, pero se recuperó en 2022 con un crecimiento del 132 % y en 2023 con 8 %, con un crecimiento promedio anual del 15 %. Las importaciones agrícolas desde India aumentaron un 55 % en 2020, cayeron un 47 % en 2021, crecieron un 34 % en 2022 y disminuyeron un 13 % en 2023, con un crecimiento promedio anual del 7 %. Entre los productos exportados, los arándanos pasaron de no registrarse en 2019 a alcanzar \$ 1580 millones USD en 2023, representando el 27,39 % del total exportado. La tara en polvo creció de \$ 597 000 USD en 2019 a \$ 960 000 USD en 2022, pero cayó un 79,79 % en 2023. Se concluye que, a pesar del crecimiento en algunos productos, existen barreras logísticas y arancelarias que limitan el comercio bilateral. Se recomienda acelerar las negociaciones para un tratado de libre comercio y mejorar la infraestructura comercial.

Palabras clave: arándanos, barreras logísticas, comercio agrícola, exportaciones peruanas, índice de intensidad comercial, tratado de libre comercio.

Introduction

The commercial exchange in the agricultural sector between Peru and India represents a significant opportunity to boost economic growth and sustainability in both nations, in addition to supporting the work conducted to formalize a free trade agreement (MINCETUR, 2023). In this sense, this sector is especially crucial, given the complementarity between the economies of both countries. Specifically, while India excels in the production of grains, spices, and agricultural technology (Ivanov *et al.*, 2022), Peru is known for its variety of fruits and vegetables, which are in high demand in the international market (Arbulú *et al.*, 2024; Montes *et al.*, 2024). This is key to identifying and leveraging opportunities that benefit both countries, focusing on the transfer of agricultural goods and seeds and inputs for this sector, as well as the adoption of sustainable agricultural practices, as evidenced when two countries decide to enter into a free trade agreement (FTA) as a strategic alliance (Ando *et al.*, 2022; Jongwanich, 2024; Udbye, 2017). Effective collaboration between countries through commercial partnership proposals boosts export growth (Lombana, 2020), and, focusing on a key sector for Peru, development opportunities arise through its economy.

On the other hand, from an economic and social perspective, strengthening this trade can contribute to stabilizing food prices and provide a competitive advantage over other countries with which there is no FTA (Ivanova, 2019). Moreover, the entry of key inputs into Peru ensures food stability. At a macroeconomic level, the expansion of agricultural trade not only fosters GDP growth but also promotes job creation (Ampuero *et al.*, 2021), especially in rural areas where agricultural activity is predominant and constitutes a significant source of income (Carvajal-García *et al.*, 2019).

From a global perspective, the agricultural sector is influenced by the growing demand for food due to the increasing population, which is expected to reach around 9,7 billion by 2050 (UN, 2024). This situation drives countries to seek new markets and diversify their export portfolios (Gnangnon and Priyadarshi, 2016). In this context, the volatility of agricultural product prices becomes a central issue (Martin and Anderson, 2012). Indeed, prices are subject to significant fluctuations due to factors such as extreme weather conditions, which are exacerbated by climate change, agricultural policies of key producing nations, and the concentration of products among major global producers (Mora and Olabisi, 2023).

Regarding the relationship between Peru and India, it is characterized by an incipient exchange but with significant growth potential, especially in India where its demand for products from other countries

has grown significantly (Basu, 2022). Moreover, this country, with its vast population, presents a huge market for agricultural exports (Shilpa and Sharma, 2021), while Peru offers a variety of agricultural goods that can meet India's demand for new and exotic products, as it already does with significant trading partners (Seclen, 2022). Nevertheless, there are some challenges that limit trade such as the logistical and tariff barrier. In particular, the long geographical distance between both countries increases transportation costs, which can make Peruvian products less competitive in the Indian market compared to those from closer suppliers. This is similar to other agricultural markets where logistical costs are a key determinant of the final price (Nonalaya *et al.*, 2021). In India, custom tariffs and import regulations are restrictive and high, further complicating bilateral trade (Market Access Map, 2024).

Ur-Rashid and Khan (2024) also highlighted this in their research on the South Asian Free Trade Area (AFTA), which evidenced that trade in this region of Asia (Bangladesh, India, Pakistan, and Sri Lanka) presents severe challenges due to cumbersome procedures, the ruthless application of non-tariff measures (NTMs), and port restrictions. Specifically, they indicate that India, representing the most important economy in the SAARC region, has a coverage rate of 45,52 % and a frequency index of 43,71 % regarding its import activities. However, the application of restrictive measures such as quantitative restrictions and intricate bureaucratic processes generate very high costs and present a challenge for trade relations that other countries want to establish. Therefore, the study recommends establishing mechanisms that enable member countries to recognize certificates and tests approved by exporting countries, as well as streamlining export and import processes through free trade agreements (Ur-Rashid and Khan, 2024).

The lack of direct and specific trade agreements in the agricultural sector also limits this exchange. Indeed, although Peru and India are part of multilateral forums and have framework agreements for cooperation, the absence of a specific free trade agreement that addresses the needs and opportunities in the agricultural sector represents a significant gap that must be filled to facilitate greater trade flow, although, by 2024, substantial progress has been made through negotiation rounds (El Peruano, 2024). For Peru, agribusiness trade with India is not only an economic opportunity but also a strategic necessity to diversify markets and reduce its dependence on traditional export destinations such as the United States and Europe (Yllescas-Rodríguez *et al.*, 2021). Peru, due to its diversity of microclimates, produces a unique variety of agricultural products such as quinoa, blueberries, ginger, and various types of

peppers (Guevara and Montenegro, 2023; Montes *et al.*, 2023), which are in high demand in international markets, including India. However, it is essential for this Latin American country to strengthen its capacity in terms of international certifications and compliance with quality standards required by demanding markets (Castillo and Mori, 2023; Olaza, 2023).

From another perspective, Baroni (2021) specified in his research that during the period 2018 - 2019, Latin America's participation in Indian foreign trade decreased to 3,59 % due to economic recessions and falls in the prices of basic export products. Moreover, India faces a sustained trade deficit with the region, mainly due to its limited presence in global trade and high tariffs, particularly in the agricultural sector, where the average tariff reached 36,4 % in 2014 - 2015, as well as sanitary and phytosanitary measures and technical barriers increased. Consequently, this situation makes trade with South America difficult due to the pattern of inter-industrial trade exchange. On the other hand, nearly 20 % of the oil and 22 % of the vegetable oil imported by India come from Latin America, showing a significant concentration in the region's export portfolio. Therefore, Latin America presents promising prospects for India, not only in terms of food and energy security but also in the field of South-South cooperation. In this regard, both parties face the task of improving market research, fostering mutual understanding, and promoting the communication of shared advantages. Additionally, efforts should be directed towards improving infrastructure and logistics and, at the same time, reducing operating expenses.

Therefore, this study represents a crucial contribution to understanding economic cooperation between Peru and India. From a theoretical perspective, it applies international trade theories, such as comparative advantage and the Heckscher-Ohlin theory (Palmieri, 2019) to understand the interactions between these different economies. From a methodological perspective, a quantitative analysis of historical trade flows is conducted using models that allow comparisons with other significant economies for Peru. Finally, from a practical perspective, this analysis supports the Peruvian government's efforts to finalize the FTA with India.

The main objective of this research was to analyze the agricultural trade exchange between Peru and India between 2019 and 2023. Specifically, this analysis focuses on Peru's agricultural exports to India and the agricultural imports from the Asian country. Consequently, this study seeks to understand the dynamics and trends characterizing these trade flows, providing a detailed view of the bilateral trade in the agricultural sector between both countries.

Methods

This study corresponds to a quantitative research type, as it is based on the measurement and analysis of statistical data. Specifically, it has a descriptive scope, as it performs an analysis of trade flows between Peru and India. Additionally, it identifies variables and phenomena related to the main products traded between both countries, without aiming to establish causal relationships or intervene in the subject of study. The design is non-experimental, focusing on the observation and analysis of data without directly manipulating the variables (Hernández and Mendoza, 2018). In this regard, the research was based on data extracted from SUNAT and INFOTRADE (PROMPERU) records, focusing on tariff items from the agro-industrial sector, which were crucial for analyzing the agricultural exports and imports of several basic products between India and Peru.

Data collection for this research covered a 5-year period, from 2019 to 2023. During this time frame, researchers focused on analyzing agricultural exports and imports of important basic products between India and Peru, allowing a comprehensive analysis of trends in the agricultural export sector. A documentary analysis was conducted using a rigorous data extraction protocol from the Infotrade platform managed by PROMPERU. This platform provided data on Peru's exports and imports of products from India. The study applied a methodology that integrates and allows the joint interpretation of some trade flow indicators and predictive results on trade exchange. Thus, this research attempts to contribute by presenting a prospective overview of trade relations between Peru and India, in the face of a potential negotiation of a FTA. Consequently, this analysis provides a clear understanding of bilateral trade flows between both countries through the elaboration of a ranking of subheadings that identifies those agricultural products Peru should prioritize in potential trade negotiations with India.

This study employed analytical tools such as the trade intensity index (TII), average annual growth, and percentage variation rate to explore and analyze results related to the research questions. Specifically, the TII was calculated to assess whether the trade value between the two countries exceeds or falls short of expectations based on their significance in global trade. Hence, it was calculated as follows, using an adapted version of the World Bank's trade intensity index (2022):

$$IICX_{ij} = (x_{ij}/X_{it})/(x_{wj}/X_{wt})$$

$$IICM_{ij} = (m_{ij}/M_{it})/(m_{wj}/M_{wt})$$

Where:

IICXij: Trade intensity index of Peruvian agricultural exports to India

xij: Agricultural exports from Peru to India

Xit: India's total exports to Peru

xwj: Peru's total exports to India

Xwt: Peru's total exports to the world

IICMij: Trade intensity index of Peruvian agricultural imports from India

mij: Agricultural imports from Peru to India

Mit: India's total exports to Peru

mwj: Peru's total imports from India

Mwt: Peru's total world imports to the world

These tools are essential for understanding data trends and patterns during the specified period, as well as for making informed interpretations of India's agricultural export sector.

Results and discussion

According to Table 1, the trade intensity index of Peruvian agricultural exports to India decreased by 40 % in 2020 compared to 2019 and by 41 % in 2021. However, in 2022, it increased by 132 %, and in 2023, by 8 %. This suggests that, on average, the trade intensity of agricultural exports has grown at an average annual rate of 15 %.

In Table 2, the trade intensity index of Peruvian agricultural imports from India increased by 55 % in 2020 compared to 2019. In 2021, it decreased by 47 %, while in 2022, it increased again by 34 %. In

2023, the decrease was 13 %. This suggests that, on average, the trade intensity of agricultural imports has grown at an average annual rate of 7 %.

Table 3 shows a steady increase in agricultural product exports from Peru to India during the period from 2019 to 2023. In 2019, the total export value was \$ 4801 thousand USD, but it significantly decreased in 2020 to \$ 1774 thousand USD, representing a reduction of 63,06 % compared to 2019. However, in 2021, the total export value increased to \$ 3296 thousand USD, 85,12 % more compared to the previous year. This growth continued in the following years, with increases of 49,46 % in 2022 and 10,28 % in 2023, reaching a peak value of \$5765 thousand USD. The main exported products include blueberries, ginger, mangoes, cocoa beans, vegetable juices and extracts, tara seeds, Brazil nuts, quinoa, nuts, and powdered tara, among others. Among these, blueberries and powdered tara experienced a notable increase in export value throughout the analyzed period.

Blueberries went from no exports in 2019 and 2020 to reaching a value of \$ 1580 thousand USD in 2023, becoming a significant part of total exports during this year, when they accounted for 27,39 % of the total value of agricultural exports to India. Meanwhile, powdered tara recorded exports worth \$ 597 thousand USD, rising to \$ 960 thousand USD in 2022 before decreasing to \$ 194 thousand USD in 2023, a 79,79 % decline compared to the previous year. On the other hand, some products, such as ginger and vegetable juices and extracts, exhibited fluctuations in their export values over the analyzed years. Ginger peaked in 2021 at \$ 38 thousand USD, while vegetable juices and extracts reached their highest value in 2022 with \$ 690 thousand USD.

Table 1. Trade intensity index of Peruvian exports to India (in thousands of USD)

	2019	2020	2021	2022	2023
Agricultural exports from Peru to India	4 801	1 787	3 296	4 941	5 765
Exports from Peru to India	1 786 927	1 155 178	2 543 011	2 302 482	2 526 369
Total exports from Peru	48 013 997	46 442 824	41 924 640	60 919 778	63 642 603
Total Indian exports to Peru	834 137	771 556	984 464	1 021 488	1 051 329
EII	0,1547	0,0931	0,0552	0,1280	0,1381

EII: Export trade intensity index.

Table 2. Trade intensity index of Peruvian imports from India (in thousands of USD)

	2019	2020	2021	2022	2023
Agricultural imports from Peru to India	18 109	19 922	21 630	23 235	25 499
Imports from Peru to India	834 137	771 556	984 464	1 021 488	1 051 329
Total imports of Peru	40 199 571	33 850 083	46 589 106	54 687 912	48 797 020
Total Indian imports to Peru	1 786 927	1 155 178	2 543 011	2 302 482	2 526 369
ITII	48,84 %	75,66 %	40,25 %	54,03 %	46,85 %

ITII: Import trade intensity index.

Table 3. Main agricultural product exports from Peru to India from 2019 to 2023 (in thousands of USD)

		2019	2020	2021	2022	2023
HS	Total	4801	1774	3296	4941	5765
810 400 000	Blueberries	0	0	166	742	1 580
910 110 000	Ginger	0	0	38	0	838
804 502 000	Mangoes	0	0	0	6	722
180 1001 900	Cocoa beans	1	1	2	56	516
1 302 199 900	Vegetable juices and extracts	73	264	361	690	376
1 302 391 000	Tara seeds	0	29	200	924	283
801 220 000	Brazil nuts	132	60	735	745	274
1 008 509 000	Quinoa	216	142	30	80	261
2 008 199 000	Other nuts	0	5	0	0	228
1 404 902 000	Powdered tara	597	424	699	960	194
	Others	3782	848	1064	738	493

HS: harmonized system

The analyzed data on trade intensity reflect a continuous evolution and adaptation of trade and export practices that can be compared with the findings of previous research and international trade theories, such as comparative advantage and the Heckscher-Ohlin theory (Palmieri, 2019). The increases observed in agricultural exports from Peru to India, despite the decreases, suggest a potential growth trend that aligns with the observations of Ivanov *et al.* (2022) and Montes *et al.* (2024) regarding the strength and diversity of Peruvian agriculture. These factors also correspond to the opportunities identified in the economic complementarity between both nations, as suggested by Arbulú *et al.* (2024) and Jongwanich (2024). In this context, the implementation of a free trade agreement between Peru and India, according to Ando *et al.* (2022) and Udbye (2017), is presented as a key strategy to mitigate the logistical and tariff challenges that currently limit greater exchange, as pointed out by Nonalaya *et al.* (2021).

The trade alliance between Peru and India could enhance the transfer of agricultural goods, which could become a crucial factor to stabilize food prices in Peru, an aspect highlighted by Ivanova (2019) and reinforced by macroeconomic studies by Ampuero *et al.* (2021) and Carvajal-García *et al.* (2019). Additionally, the unexpected price fluctuations of agricultural products, discussed by Martin and Anderson (2012) and Mora and Olabisi (2023), highlight the importance of diversifying export portfolios and income sources, particularly in rural areas, which are critical challenges that both Peru and India must address together.

Finally, the results obtained corroborate previous theories and studies on the advantages and challenges of bilateral agricultural trade, as indicated Baroni (2021), who pointed out that Latin American countries have promising prospects in trade relations with India, reinforcing the need for policies that promote trade understanding and communicate shared advantages through treaties. All this underscores the necessity of well-defined policies and a free trade agreement that addresses unique opportunities in the agricultural sector between Peru and India.

Conclusions

Agricultural trade between Peru and India from 2019 to 2023 shows an evolution marked by fluctuations in both exports and imports. Despite the decline in the trade intensity index during 2020 and 2021, a notable recovery was evidenced in 2022, followed by further growth in 2023, resulting in an average annual growth of 15 %. On the other hand, agricultural imports from India have grown at a moderate rate of 7 % per year. These figures reflect that while there is growth potential, bilateral agricultural trade still faces obstacles that hinder its full consolidation.

Regarding key agricultural products in trade between both countries, blueberries, tara powder, vegetable juices and extracts, quinoa, and nuts stand out. Blueberry exports have gained particular importance, rising from nonexistent in 2019 to 27,39 % of total exports to India in 2023, with a value of \$ 1,58 million USD. However, other products such as tara powder have experienced significant declines,

indicating instability in their commercialization. This volatility underscores the need for trade strategies that promote diversification and sustained growth of these products in the Indian market.

The analysis also identifies logistical and tariff barriers that hinder bilateral agricultural trade. Geographical distance and high transportation costs affect the competitiveness of Peruvian products, while tariff rates and restrictive custom procedures in India pose an additional obstacle. However, the growth potential is evident, especially given the increasing Indian demand for imported agricultural products.

To strengthen agricultural trade between Peru and India, it is crucial to consider signing a free trade agreement (FTA) that reduces tariffs and simplifies custom procedures. Additionally, improving logistical infrastructure and ensuring high-quality standards for Peruvian products are necessary to enhancing their competitiveness in the Indian market. This would promote a more dynamic and stable trade flow between both nations.

In conclusion, agricultural trade between Peru and India offers significant opportunities but requires strategic efforts to overcome logistical and tariff barriers. The recovery of the trade intensity index and the growth of products such as blueberries highlight the potential of the Indian market. However, the volatility of certain products underscores the need for a comprehensive approach, including signing an FTA and improving commercial infrastructure. If these advances are achieved, a more stable and beneficial exchange for both economies would be consolidated, favoring market diversification and the development of Peru's agricultural sector.

References

- Ampuero, K.; Egas, R.; Huertas, F.; Silva, R. and Villar, R. (2021). *Exportaciones de alcachofas y mangos, alternativas de diversificación para el crecimiento del PBI real peruano* [Bachelor's thesis]. San Ignacio de Loyola University. <https://repositorio.usil.edu.pe/server/api/core/bitstreams/cd26dc40-7dd4-45b1-a4b8-fe331564ab45/content>
- Ando, M.; Urata, S. and Yamanouchi, K. (2022). Do Japan's free trade agreements increase its international trade? *The Journal of Economic Integration*, 37(1), 1-29. <https://doi.org/10.11130/jei.2022.37.1.1>
- Arbulú, M.; Montes, J.; Ludeña, D.; Arbulú, J.; Aldana, M.; Pantaleón, A.; Arbaiza, K. and Ruiz, S. (2024). Diversification of fresh asparagus exports from Perú. *Journal of Educational and Social Research*, 14(2), 258-272. <https://doi.org/10.36941/jesr-2024-0041>
- Baroni, P. (2021). Latin America: An outstanding debt in India's foreign policy. *Relaciones Internacionales*, 94(1), 49-72. <https://doi.org/10.15359/ri.94-1.3>
- Basu, A. (2022). The India-EU FTA and its potential impact on India's dairy sector: A quantitative analysis. *Foreign Trade Review*, 57(1), 7-26. <https://doi.org/10.1177/00157325211050763>
- Carvajal-García, M.; Zuluaga-Arango, P.; Ocampo-López, O. and Duque-Gómez, D. (2019). Banana exports as a rural development strategy in Colombia. *Apuntes del CENES*, 38(68), 113-148. <https://doi.org/10.19053/01203053.v38.n68.2019.8383>
- Castillo, M. and Mori, J. (2023). *La certificación sostenible GlobalG.A.P. y su relación en la exportación de espárragos de las regiones Ica y la libertad hacia EE. UU durante el periodo 2018 - 2022* [Bachelor's thesis]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <http://hdl.handle.net/10757/669329>
- El Peruano. (2024). *Sétima ronda de negociaciones del acuerdo comercial entre Perú e India concluye en Nueva Delhi*. <https://elperuano.pe/noticia/241447-septima-ronda-de-negociaciones-del-acuerdo-comercial-entre-peru-e-india-concluye-en-nueva-delhi>
- Gnangnon, S. and Priyadarshi, S. (2016). Export product diversification, services production and exports in least developed countries. *Journal of International Commerce, Economics and Policy*, 7(3), 1650013. <https://doi.org/10.1142/S1793993316500137>
- Guevara, L. and Montenegro, M. (2023). *Diversificación de las exportaciones de arándanos del Perú, 2012 - 2021* [Bachelor's thesis]. Escuela Profesional de Administración de Negocios Internacionales. <https://hdl.handle.net/20.500.12727/12691>
- Hernández-Sampieri, R. and Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (p. 714). Ciudad de México: Mc Graw Hill Education.
- Ivanov, A.; Molodyko, K. and Kalimullina, M. (2022). The grain market in India and the creation of the BRICS grain union. *BRICS Law Journal*, 9(3), 117-143. <https://doi.org/10.21684/2412-2343-2022-9-3-117-143>
- Ivanova, Y. (2019). The Peru-EU free trade agreement: Obstacle or opportunity for Peru's sustainable development? In Beringer, S. L.; Maier, S. and Thiel, M. (Eds), *EU Development Policies. International Political Economy Series*. Camden: Palgrave Macmillan. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01307-3_9
- Jongwanich, J. (2024). Free trade agreements (FTAs) and export structures: evidence from Thailand. *Journal of the Asia Pacific Economy*, 1-39. <https://doi.org/10.1080/13547860.2023.2300584>
- Lombana, M. (2020). Free trade agreements between Peru, Colombia, and the United States. *The American Journal of Economics and Sociology*, 79(1), 199-232. <https://doi.org/10.1111/ajes.12312>
- Market Access Map. (2024). *Condiciones de acceso a los mercados*. Market Access Map. <https://www.macmap.org/es>
- Martin, W. and Anderson, K. (2012). Export restrictions and price insulation during commodity price booms. *American Journal of Agricultural Economics*, 94(2), 422-427. <https://doi.org/10.1093/ajae/aar105>
- MINCETUR. (2023). *Acuerdos comerciales del Perú*. Perú, Ministerio de Comercio Exterior y Turismo (MINCETUR). https://www.acuerdoscomerciales.gob.pe/En_Vigencia/EEUU/Preguntas_Frecuentes.html
- Montes, J.; Pantaleón, A.; Arbulú, M.; Castro, G.; Mogollón, F.; Ramos, E. and Izquierdo, J. (2023). Diversification of Peruvian ginger exports 2012 - 2021 (Conference). Leadership in Education and Innovation in Engineering in the Framework of Global Transformations: Integration and Alliances for Integral Development, Buenos Aires, Argentina. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2023.1.1.1053>

- Montes, J.; Vásquez, K.; Ludeña, D.; Pantaleón, A.; Fariás, J.; Suárez, F.; Escalona, E. and Arbulú-Ballesteros, M. (2024). Market diversification and competitiveness of fresh grape exports in Peru. *Sustainability*, 16(6), 2528. <https://doi.org/10.3390/su16062528>
- Mora, J. and Olabisi, M. (2023). Economic development and export diversification: The role of trade costs. *International Economics*, 173, 102-118. <https://doi.org/10.1016/j.inteco.2022.11.002>
- Nonalaya, E.; Castillo, S.; Huamantla, I.; Ramos, W. and Balbuena, C. (2021). Analysis of internal logistic cost on exports of Peruvian coffee in the period 2015 - 2019. *Acta Logística*, 8(1), 73-81. <https://doi.org/10.22306/al.v8i1.206>
- Olaza, X. (2023). *Análisis de la certificación de comercio justo en las exportaciones de café en grano verde del departamento de San Martín hacia Alemania, durante el período 2011-2020* [Bachelor's thesis]. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas. <http://hdl.handle.net/10757/667553>
- UN. (2024). *Desafíos globales: población*. United Nations Organization (UN). <https://www.un.org/es/global-issues/population>
- Palmieri, F. (2019). *Repensando las teorías del comercio internacional*. Buenos Aires: Instituto de Estrategia Internacional.
- Pantaleón, A.; Montes, J.; Portilla, L.; Morales, P.; Azañero, R. and Montes, R. (2024). Dynamics of quinoa (*Chenopodium quinoa*) production and exports in Peru. *Revista Alfa*, 8(22), 84-94. <https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v8i22.250>
- Seclen, A. (2022). *Impacto del TLC Perú - China en las exportaciones del sector agrícola peruano en el periodo 1999 - 2021* [Bachelor's thesis]. Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/108809>
- Shilpa, S. and Sharma, A. (2021). Trends in production and export of major fruits in India. *Indian Journal of Economics and Development*, 17(2), 462-467. <https://doi.org/10.35716/IJED/20282>
- Udbye, A. (2017). The United States free trade agreements: How successful have they been? *The International Trade Journal*, 31(5), 457-478. <https://doi.org/10.1080/08853908.2017.1362365>
- Ur-Rashid, H. and Khan, M. (2024). Standards and non-tariff barriers in trade – A case study of South Asia. *Structural Change and Economic Dynamics*, 69, 427-437. <https://doi.org/10.1016/j.strueco.2024.03.002>
- World Bank. (2022). Data Bank. <https://databank.worldbank.org/home.aspx>
- Yllescas-Rodríguez, P.; Espinoza-Casco, R. and Macha-Huamán, R. (2021). Diversificación de la oferta exportable y las exportaciones peruanas. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, 6(1), 322-341. <https://doi.org/10.35381/r.k.v6i1.1510>

Harnessing agro-industrial waste for cellulose extraction and biodegradable packaging production: a study from the Peruvian Amazon

Aprovechamiento de residuos agroindustriales para la extracción de celulosa y la producción de envases biodegradables: un estudio desde la Amazonía peruana

Grober Panduro Pisco ^{1,3}, Lady Di Hoyos Shica ^{1,4}, Edwar Edinson Rubina ^{1,5}, Glendy Sánchez Sunción ^{1,6}, Gustavo Nilo Panduro Rocha ^{1,7}, David Leon Moreno ^{1,8}, Dalia Carbonel ^{2,9}

¹Universidad Nacional de Ucayali. Pucallpa, Perú. ²Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. ³✉ grober_panduro@unu.edu.pe;

⁴✉ hoyos.shica@hotmail.com; ⁵✉ erubina@senace.gob.pe; ⁶✉ glendy_sanchez@unu.edu.pe; ⁷✉ gustavo_panduro@unu.edu.pe;

⁸✉ david_leon@unu.edu.pe; ⁹✉ dcarbonel@uni.pe



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.112636>

2024 | 73-1 p 73-81 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-01-24 Acep.: 2025-02-05

Abstract

This study, based in the department of Ucayali in Peru, focuses on quantifying waste from the agro-industry sector and estimating potential cellulose yield for biodegradable packaging production. Given the significant environmental impact of non-degradable plastic packaging, cellulose extracted from waste material offers a sustainable alternative with promising applications in packaging. A sample of 17 agro-industrial enterprises was surveyed to gather data on their production and waste generation. The findings suggest significant potential for cellulose extraction from waste generated in the processing of seven primary crops. Despite positive initiatives to reuse waste, there are opportunities for improvement, particularly regarding the disposal of non-reusable waste. The research provides practical solutions for waste management, highlighting the need for policy measures that encourage its responsible disposal and the reuse of agro-industrial waste. It also stresses the importance of capacity building and training for small and medium-sized enterprises in the sector. The findings present contributions to waste management, environmental conservation, sustainable material production, and policy-making, with implications for both regional and global efforts to foster sustainable practices.

Keywords: Agriculture, bioplastics, Peru, waste management, waste reuse.

Resumen

Este estudio, realizado en el departamento de Ucayali en Perú, se centra en cuantificar los residuos del sector agroindustrial y estimar el rendimiento potencial de celulosa para la producción de envases biodegradables. Dado el importante impacto ambiental de los envases de plástico no degradables, la celulosa extraída de residuos ofrece una alternativa sostenible con aplicaciones prometedoras en este sector. Se encuestó una muestra de 17 empresas agroindustriales para recopilar datos sobre su producción y generación de residuos. Los hallazgos sugieren un potencial significativo para la extracción de celulosa a partir de residuos generados en el procesamiento de siete cultivos primarios. A pesar de las iniciativas positivas para reutilizar los residuos, hay oportunidades de mejora, particularmente en lo que respecta a la eliminación de residuos no reutilizables. La investigación proporciona soluciones prácticas para la gestión de residuos, destacando la necesidad de políticas que fomenten su eliminación responsable y la reutilización de residuos agroindustriales. También destaca la importancia de desarrollar capacidades y formar a las pequeñas y medianas empresas del sector. Los hallazgos presentan contribuciones a la gestión de residuos, la conservación del medio ambiente, la producción de materiales sostenibles y la formulación de políticas, con implicaciones para los esfuerzos regionales y globales para fomentar prácticas sostenibles.

Palabras clave: Agricultura, bioplásticos, gestión de residuos, Perú, reutilización de residuos.

Introduction

Solid waste generation poses a significant global challenge, particularly impacting developing countries and areas like the cities in the Amazon rainforest, where socio-economic and environmental challenges lead to inadequate waste management. In the department of Ucayali in the Peruvian Amazon, despite contributing minimally to Peru's total production and exports, there's significant growth potential in the agro-industry. However, the region faces critical issues related to solid waste management. The lack of proper waste disposal facilities, like sanitary landfills, has resulted in widespread open dumping, posing health hazards and environmental damage (Panduro Pisco, 2021). Recognizing agro-industrial waste as a resource is crucial for environmental protection and business innovation. This waste has a range of applications including organic fertilizer production (Kouser *et al.*, 2024), environmental cleanup (Samraj *et al.*, 2022), and the manufacturing of biodegradable packaging (Ahmad *et al.*, 2024).

In the department of Ucayali alone, the scale of potential agro-industrial waste generation can be directly inferred from the 2020 crop production volumes, as reported by the Integrated System of Agricultural Statistics of the Peruvian Ministry of Agrarian Development and Risk: approximately 862 636 tons of bananas, 886 987 tons of palm oil, and 21 616 tons of cacao (DRA Ucayali, 2020). When compared to national totals, Ucayali's production represents more than 10 % of the country's output in these crops, highlighting the regional importance of these agro-industries. According to the Food and Agriculture Organization (FAO), such agricultural intensities are associated with substantial waste volumes, which, if not managed properly, can lead to severe environmental degradation (FAO, 2023). In Latin America, regions similar to Ucayali report substantial waste across the supply chain for key crops such as cocoa and bananas. For instance, losses during the processing stage can reach up to 20 % for cocoa (*Theobroma cacao*) and nearly 5 % for bananas (*Musa spp.*), often due to inadequate waste management infrastructures that fail to treat or utilize these by-products effectively (FAO, 2022). This context not only frames the gravity of the issue in Ucayali but also echoes a global crisis, emphasizing the urgent need for sustainable waste management strategies.

Accurately quantifying agro-industrial waste is vital to unlock its potential as a cellulose source for sustainable packaging, a strategy applicable in regions with similar socio-economic contexts as the study area and without the need for high-tech solutions. However, currently, there is no comprehensive data available on the volume or composition of

waste generated by agro-industrial activities in the region. This absence of data hinders effective waste management strategies and limits the potential for sustainable resource utilization. To address this gap, this research quantifies the agro-industrial waste produced in the department of Ucayali in the Peruvian Amazon, estimates potential waste production, and calculates the yield of cellulosic pulp for biodegradable packaging. By leveraging accessible data from agricultural statistics and company records, the study estimates waste generation rates based on input volume or production levels, such as determining waste output from a rice processing plant based on the final product quantity. Focusing on seven primary crops, the research not only assesses waste generated from crop processing but also explores the innovative use of this waste in cellulose extraction, positioning agro-industrial waste as a valuable resource for sustainable material production. This approach seeks to address global environmental concerns, particularly plastic pollution, and advocates for a shift towards sustainable waste management and business practices. The hypothesis suggests that agro-industrial waste in the region has substantial potential for cellulose extraction, underlining the study's relevance and potential impact on sustainable development efforts, both regionally and globally.

Materials and methods

Location and description of the study area

The study was conducted in the Peruvian provinces of Coronel Portillo and Padre Abad, located in the department of Ucayali (Figure 1). Covering an area of approximately 102 410 km² (39 536 sq mi), the region is located in the eastern part of the country and encompasses portions of the Amazon basin. The region's climate is typically hot and humid. The average annual precipitation is approximately 1500 mm in Coronel Portillo and 2000 mm in Padre Abad, with the dry season typically spanning from June to August.

Two distinct ecosystems define the study area: the restinga, a floodable alluvial forest, and the high-altitude area, incorporating both low and high hill forest. The flood seasonality allows for the cultivation of crops with short vegetative periods such as rice, corn, peanuts, beans, cassava, banana, vegetables, and cucurbits. Additionally, crops such as camu camu (*Myrciaria dubia*), sapote (*Pouteria sapota*), and soursop (*Annona muricata*), which can withstand flooding and root saturation during high water levels, are well-suited for these zones. Conversely, the high-altitude areas are located on hills and terraces that are not subject to flooding.

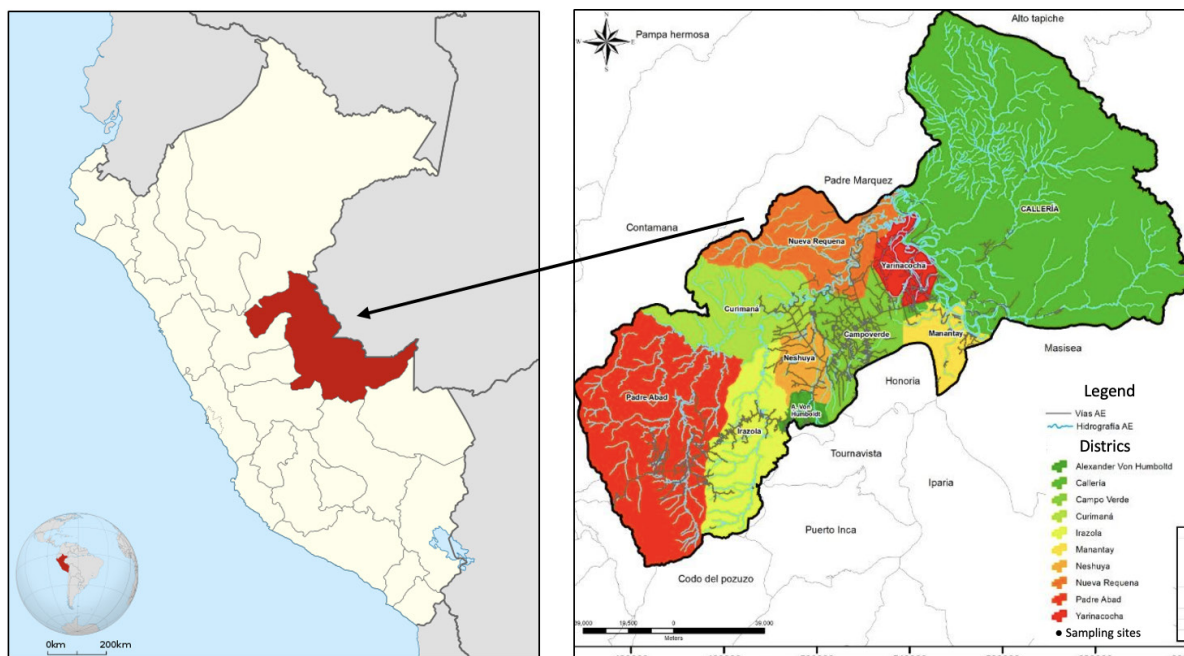


Figure 1. Study area location in Ucayali region, Peru.

Agriculture forms a primary economic pillar in the Ucayali region, conducted predominantly by family units around the department's major rivers and main roads. As per data provided by the Statistics Office of the Regional Office of Agriculture, the region's largest crop production in 2020 was oil palm (*Elaeis guineensis*), banana, cassava (*Manihot esculenta*), and rice (*Oryza sativa*) (Panduro Pisco, 2021).

Population, sample selection and data collection

The study area houses a total of 112 agro-industrial enterprises engaged in processing a variety of inputs, according to data from the Regional Agrarian Directorate of the Department of Ucayali (DRA Ucayali, 2020) (Table S1). 57 agro-industrial enterprises were preliminary selected, employing Equation 1 with a sampling error of 10 %. Initial contact was made with companies that were geographically close to one another, easily accessible, and not located in remote areas far from roads or other companies. Of the 57 companies contacted, 21 were non-operational and 16 did not respond. A total of 20 companies were ultimately surveyed, but only 17 provided comprehensive information about raw material volumes, production, and solid waste generation. With these final numbers, the margin of error was recalculated using Equation 1.

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{E^2 (N-1) + Z^2 \cdot p \cdot q} \quad (\text{Eq. 1})$$

Where n represents the sample size, p is the probability of success (set at 87.7 % due to the rural setting and greater dispersion), q is the probability of failure (12.3 %), E is the margin of error, N is the population size (112), and Z is the confidence level (set at 1.96 for a confidence level of $1-\alpha = 95$ %). According to the final sample size, the margin of error was redetermined as 14 %.

Surveys were administered in October and November 2020 to companies involved in the processing of sugarcane (*Saccharum officinarum*), rice, cassava, plantain, coffee (*Coffea arabica*), cocoa, and palm oil. During each company visit, a structured survey (Table S2) comprising both closed and open-ended questions was used to gather data on their production, raw material consumption, waste generation, access to basic services, and environmental management practices. Operational managers provided flow charts data (Figure S1).

Data processing

The rates of waste generation per feedstock and product, and feedstock efficiency, were calculated using Equations 2, 3 and 4, respectively.

$$\text{Waste per feedstock} = \frac{SW}{F} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{Waste per product} = \frac{SW}{P} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\text{Efficiency (\%)} = \frac{F}{P} \quad (\text{Eq. 4})$$

Here, SW refers to the monthly volume of solid waste generated (in tons), F is the monthly volume of feedstock, and P is the monthly production volume (both in tons). Equations 5 and 6 were used to estimate waste and cellulose generation.

$$\text{Waste generation} = \text{Production} \cdot \text{Waste per feedstock} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{Cellulose} = \text{Waste generatio} \cdot \% \text{ cellulose} \quad (\text{Eq. 6})$$

The term “production” in these equations refers to the yield of each crop in 2020, as per data from the Integrated System of Agricultural Statistics of the Peruvian Ministry of Agricultural Development and Irrigation (Midagri, 2021). The cellulose percentages were derived from references that specify the chemical composition of each waste type (Table 4).

Results

Environmental management, energy consumption and waste reuse in the surveyed companies

The survey focuses on the agro-industrial activities in a specific area, highlighting the diversity in the scale of operations among enterprises. Larger enterprises, such as those producing alcohol, rice, and palm oil, possess extensive machinery and workforce. In contrast, smaller enterprises, often with less than ten workers, are engaged in producing various products like panela, *aguardiente*, and banana chips. Environmental management is notably lacking in small and medium-sized enterprises, with most perceiving environmental issues as a global rather than local concern. Only one company, Indomalsa, actively employs an environmental management tool. Energy consumption in these companies is primarily derived from non-electric sources, with diesel and wood being common, reflecting a pattern seen in broader agricultural sectors. However, there are disparities in electricity consumption costs among these enterprises, with those in rice production incurring significantly higher costs compared to those in cocoa processing and chocolate production, as detailed in the surveyed data.

Table 1 presents the production characteristics of the surveyed companies, providing detailed insight into the main product, total number of workers, total number of equipment units, frequency of equipment maintenance, and monthly electricity expenditure.

Waste reuse

The flow diagrams in supplementary Figure S1 depict the distinct processes and by-products of waste generated by the various companies surveyed in

Table 1. These flow diagrams offer an exhaustive illustration of each process under investigation, detailing both the input and output components of each operation.

Table 2 collates essential information on each company’s primary feedstock, end products, and waste materials. In addition to this, the table also sheds light on the final destination of the waste produced.

Estimation of waste and cellulose pulp generation

The study calculated solid waste generation rates from various raw materials and products to estimate the volume available for cellulose recovery (Table 3). Sugarcane, cassava, and oil palm were found to be less efficient, generating more waste due to their processing methods. Conversely, rice, banana, coffee, and cocoa were more efficient, producing higher yields with most waste comprising husks and shells.

Table 4 presents the estimated solid waste generation and cellulose pulp yield for each crop studied, based on national production figures. Sugarcane processed for sugar production showed the highest levels of waste and cellulose pulp generation among all the crops analyzed.

Discussion

Environmental management, energy consumption, and waste reuse in the surveyed companies

In smaller agro-industrial enterprises, operational sustainability is heavily reliant on the cohesion and partnership among members. The failure of many such enterprises is often due to internal conflicts and lack of strong organizational structures. Regarding health and safety, only a few companies have implemented comprehensive systems, with only Santa Clara and Moliexpress fully enforcing these programs. Notably, none of the companies surveyed have ISO 14001 certification for environmental management, although two of them, Landbar and Indomalsa, have ISO 9001 certification, indicating a commitment to quality management. The energy consumption in these enterprises is minimal, often due to the artisanal nature of their production processes which mainly utilize mechanical energy and gas, with some even reporting no energy costs. A few have low electricity costs due to reliance on artisanal methods, and one company has invested in solar panels to offset energy expenses, reflecting the small scale and low-tech operations prevalent in these firms.

Table 1. Overview of production characteristics and operational details of agricultural and agro-industrial companies in Ucayali region, Peru

Company	Main product	Number of workers	Number of equipment units	Frequency of equipment maintenance	Monthly electricity expense (PEN)
Association of Ecological Products from the San Cristobal de Agua Blanca village (ASCAB)	Honey, panela, chancaca	2	5 ⁿ	After each use	0 ^R
J.M. Ucayali S.A.C (JM UCAYALI)	96° alcohol	54	20 ^{n,i}	Every 4-5 months	43000 ^E
HAVISHA Production and Commercialization of Agricultural Products S.A.C. (PISHCOTA)	Aguardiente, macerated alcohol	4	2 ⁿ	After each use	200 ^E
Agricultural Association of Cassava from the Valley of Nuevo Tunuya (AAYVNT)	Starch	4	0	None	0
Association of Cassava Producers Santa Catalina (APYSC)	Starch	3	0	None	0
ASERCAMPO S.A.C. Santa Clara Mill (SANTA CLARA)	Rice	22	20 ^{n,i}	5 times per year	20000 ^E
Industries Miller Campo Verde S.A.C. (CAMPO VERDE)	Rice	8	20 ^{n,i}	Daily, weekly, bi-weekly, yearly	15000 ^E
Express Import Export S.A.C. (MOLIEXPRESS)	Rice	8	11 ^{n,i}	Every 4 months	28000 ^E
Landbar Miller E.I.R.L (LANDBAR)	Rice	17	6 ⁱ	Semiannually	20000 ^E
Aguilar Mill E.I.R.L (AGUILAR)	Rice	11	8 ⁱ	Monthly	25000 ^E
Agroindustrial Progress Association (AAIPRO)	Banana chifles	5	9 ⁿ	Weekly	0
Cordillera Azul de Ucayali Agrarian Coffee Cooperative Ltd. (CACCAU)	Ground coffee	3	5 ⁿ	Yearly	45 ^E
Association of Entrepreneurial Women Flor de Boqueron (AMEFB)	Cocoa and chocolate paste	5	8 ⁿ	Biweekly	250 ^E
Agrarian Cooperative (ASCAH)	Cocoa and chocolate paste	3	4 ⁿ	None	80 ^E
Central Committee of Agricultural and Livestock Producers of San Alejandro (COCEPASA)	Cocoa and chocolate paste	5	5 ⁿ	After each use	90 ^E
Agricultural Association of Cacao Producers of Nuevo Ucayali (AAPCNU)	Cocoa and chocolate paste	3	4 ⁿ	After each use	130 ^E
Industries Oleaginous Monte Alegre S.A. (INDOLMASA)	Palm oil	63	66 ^{n,i}	Weekly	40000 ^E

*Note: S.A.C. stands for *Sociedad Anónima Cerrada*, closed stock company, and E.I.R.L stands for *Empresa Individual de Responsabilidad Limitada*, individual limited liability corporation. They are part of the company's legal names and typically not translated. The source of the equipment is denoted as 'n' for national and 'i' for international. The electricity supply is represented as 'R' for a combination of motor and solar panel power, while 'E' stands for power supplied by the regional electricity distribution company, Electro Ucayali.

Waste reuse

Table 2 shows that sugarcane bagasse and rice husks are utilized for energy recovery through incineration. Furthermore, both moist and dry bagasse derived from sugarcane are repurposed as compost to enrich the soil for sugarcane cultivation. Similarly, cassava peels are utilized as compost for crop nutrition. Rice husks have a wide range of reuse applications, including as an ingredient mixed for small-scale fishing, as feed for pigs, and as bedding in chicken sheds, where they eventually decompose to form organic fertilizer. However, when these husks are not sold or incinerated, they are improperly disposed of in vacant plots. This poses an inconvenience for local residents when strong winds lift and scatter the husk dust.

Banana peels are repurposed as pig feed, and bananas deemed unfit for sale are consumed by workers involved in the selection process, often prepared as boiled green bananas.

Residual coffee husks are also repurposed as fertilizer. Nonetheless, this use has potential environmental implications due to the presence of caffeine, chlorogenic acid, and tannins, substances that can exert significant ecotoxicological effects on aquatic life forms (Marew *et al.*, 2024). Cocoa husks are utilized both as fertilizers and as ingredients in infusions. Meanwhile, residues from palm oil processing can be put to various uses (Mora-Villalobos *et al.*, 2023), such as a filling substance in soil or as material for graveling. The company surveyed utilizes the empty fruit bunches and mesocarp fiber for energy through burning. Furthermore, palm kernel waste, which is also abundant in the study area, can be utilized as a soil filler or for graveling.

The surveyed companies are actively engaged in waste reuse and repurposing initiatives, including composting, selling, and using waste for energy. However, there is room for improvement in managing non-reusable waste and mitigating health and environmental risks associated with waste reuse, highlighting the necessity for enhanced waste management practices.

Table 2. Comparative analysis of feedstock sources, products, main solid wastes, and waste management practices of agro-industrial companies in Ucayali region, Peru

Company	Feedstock	Product	Main solid waste	Waste destination
ASCAB	Sugarcane ^o	Chancaca, panela, molasses ^{n,i}		Reuse, burning
JM Ucayali	Sugarcane ^o	96° alcohol ^{l,n}	Sugarcane bagasse	Reuse
PISHCOTA	Sugarcane ^o	Aguardiente, macerated alcohol ^{l,n}		Reuse
AAYVNT	Cassava ^p	Starch ^{l,n}		Reuse
APYSC	Cassava ^p	Starch ^l	Cassava peel	Reuse
SANTA CLARA	Rice ^f	Rice, rice dust, milled rice ^{l,n}		Sale, burning
CAMPO VERDE	Rice ^f	Rice, rice dust, milled rice ^{l,n}		Sale
MOLIEXPRESS	Rice ^f	Rice, rice dust, milled rice ^l	Rice husk	Sale
LANDBAR	Rice ^f	Rice, rice dust, milled rice ^{l,n}		Sale
AGUILAR	Rice ^f	Rice, rice dust, milled rice ^l		Sale
AAIPRO	Banana ^p	Banana chifles ^{l,n}	Banana peels	Reuse
CACCAU	Coffee bean ^p	Ground coffee ^{l,n}	Coffee husk	Reuse
AMEFB	Dry cacao beans ^p	Cocoa and chocolate paste ^{l,n}		Reuse
ASCAH	Dry cacao beans ^p	Cocoa and chocolate paste ^l		Reuse
COCEPASA	Dry cacao beans ^f	Cocoa and chocolate paste ^{l,n}	Cacao husk	Sale
AAPCNU	Dry cacao beans ^p	Cocoa and chocolate paste ^l		Sale
INDOLMASA	Oil palm fruit ^f	Crude palm and palm kernel oil, palm kernel flour ^{l,n}	Empty fruit bunch	Final disposal

*Note: The feedstock supply is indicated as follows: 'o' signifies sourcing from the company's or association's own land, 'p' denotes sourcing from partners—individuals who own land that is part of the company or association—, and 'f' represents sourcing from farmers, who are third parties not affiliated with the company or association. The distribution channels for the product are represented as 'l' for local, 'n' for national, and 'i' for international.

Estimation of waste and cellulose pulp generation

Table 3 presents the average rates of solid waste generation and feedstock efficiency. As an illustration, for every ton of rice produced, 0,57 tons of rice husks are generated. In comparison, Spada *et al.* (2020) documented a waste generation rate of 0.23 tons per ton of rice produced. This discrepancy could be accounted for by differences in processing efficiency or variations in feedstock quality. For palm oil processing, a yield of 16 % was computed, which aligns with the findings by Dungani *et al.* (2018). This implies that the remainder of the processed materials is waste. Similarly, the yield of cassava processing for starch was recorded at 20 %, which is consistent with the findings of Ekop *et al.* (2019), who reported that every ton of fresh cassava processed results in 680 kg of total waste. However, this study only accounted for waste derived from cassava peels. Cocoa husk makes up 52 % to 75 % of the total wet weight of the fruit (Lubis *et al.*, 2018). However, in this study, cocoa husk represents 16 % of the dry seed weight, suggesting an 84 % yield of waste. The quantity of sugarcane bagasse generated per ton of processed sugarcane aligns with the findings by Toscano Miranda *et al.* (2021), who calculated that each ton of sugarcane results in approximately 270 kg of sugarcane bagasse. However, other studies (Xu *et al.*, 2018) have posited that sugarcane bagasse constitutes up to 50 % of the total

volume of processed sugarcane. According to existing literature, the coffee industry generates between 500 kg and 600 kg of husks for every ton of processed coffee (Morales-Martínez *et al.*, 2021), which is in line with this study. However, some research (Dadi *et al.*, 2019) suggests a lower waste generation rate, stating that each ton of coffee produced results in just 1 kg of husk during the drying process.

Policy recommendations for waste management and reuse

The study highlights the potential for sustainable waste management in the agro-industrial sector, suggesting that agro-industrial waste could be repurposed in industries like paper, packaging, textiles, and biofuels. It emphasizes the need for national and local governments to adopt effective waste management and reuse strategies to foster a circular economy. The research underscores the importance of enforcing responsible waste disposal practices and recommends the creation of stringent environmental policies and regulations. These regulations would aim to reduce waste, increase energy efficiency, and promote waste reuse, transforming waste into a valuable resource. Additionally, the study suggests that building the capacity of small and medium-sized enterprises through training in partnership and environmental management is essential for

Table 3. Assessment of feedstock quality, solid waste generation rates, and feedstock conversion efficiency for different agro-industrial products in Ucayali region, Peru

Feedstock	Quality criteria	Product	Waste rate per feedstock	Waste rate per product	Feedstock efficiency
Sugar cane	8-month maturation	Chancaca, panela, liquid sugar,	0.3	6.25	5 %
Sugar cane	8-month maturation	96° alcohol	0.25	4.75	5 %
Sugar cane	8-month maturation	Aguardiente and macerated alcohol	0.33	6.34	5 %
Cassava	Size	Starch	0.40	2.00	20 %
Rice	Broken percentage, color, humidity	Rice and by-products	0.35	0.57	61 %
Banana	Weight	Chifles	0.40	0.67	60 %
Coffee beans	Moisture	Roasted coffee	0.42	0.64	65 %
Cocoa beans	Moisture	Cocoa paste and chocolate	0.16	0.20	84 %
Oil palm fruit	Maturation	Crude palm oil, crude palm kernel oil, palm kernel flour	0.26	1.66	16 %

*Note: According to the Kruskal-Wallis test, the results are not statistically significantly different (waste rate per feedstock $p = 0.087$, waste rate per product $p = 0.090$, and feedstock efficiency $p = 0.143$).

Table 4. Estimated solid waste generation and cellulose extraction potential from agricultural residues by Peruvian departments in 2020

Department	Production of each crop (tons)							Potential for cellulose production (tons)						
	Rice	Banana	Oil palm	Cassava	Coffee	Cacao	Sugarcane for sugar	Rice	Banana	Oil palm	Cassava	Coffee	Cacao	Sugarcane for sugar
Amazonas	968027	253865	-	310018	1104658	4544	-	353330	90122	-	125557	386630	1590	-
Ancash	246437	4358	-	10810	-	-	1647057	89950	1547	-	4378	-	-	699999
Apurímac	-	1170	-	1959	-	-	-	-	415	-	793	-	-	-
Arequipa	913624	18	-	690	-	-	110175	333473	6	-	279	-	-	46824
Ayacucho	108	2624	-	25335	65971	6175	-	39	932	-	10261	23090	2161	-
Cajamarca	378907	107866	-	128575	1655517	1581	-	138301	38293	-	52073	579431	553	-
Cusco	5635	76768	-	82261	688294	9740	-	2057	27253	-	33316	240903	3409	-
Huancavelica	-	3056	-	-	-	-	-	-	1085	-	-	-	-	-
Huánuco	90116	595029	62601	157267	286581	16834	-	32892	211235	20658	63693	100303	5892	-
Ica	-	6955	-	19010	-	-	-	-	2469	-	7699	-	-	-
Junín	4292	563560	-	291986	1912937	31668	-	1567	200064	-	118254	669528	11084	-
La Libertad	784026	35704	-	44969	5012	43	8609407	286169	12675	-	18212	1754	15	3658998
Lambayeque	1133060	40288	-	10982	34603	138	4177064	413567	14302	-	4448	12111	48	1775252
Lima	19	9757	-	81765	-	-	2882211	7	3464	-	33115	-	-	1224940
Loreto	163347	731173	191949	1134089	1347	665	-	59 622	259566	63343	459306	471	233	-
Madre de Dios	22205	94750	-	55405	520	1605	-	8105	33636	-	22439	182	562	-
Moquegua	-	4	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-
Pasco	4985	210880	-	146819	347558	5012	-	1820	74863	-	59462	121645	1754	-
Piura	1210024	916823	-	12746	96903	2129	705282	441659	325472	-	5162	33916	745	299745
Puno	456	30344	-	113400	190152	728	-	167	10772	-	45927	66553	255	-
San Martín	1924025	1088938	705036	294787	2369250	63085	-	702269	386573	232662	119389	829238	22080	-
Tacna	-	60	-	-	-	-	-	-	21	-	-	-	-	-
Tumbes	201609	346349	-	12704	-	831	-	73587	122954	-	5145	-	291	-
Ucayali	163184	862636	886987	283111	319437	21616	-	59562	306236	292706	114660	111803	7565	-
National TOTAL	1215470	938020	310250	512295	1214599	25257	2948342	443647	332997	102382	207479	425110	8840	1253045

*Note: The data for each crop's production corresponds to the year 2020 and is sourced from the Integrated System of Agricultural Statistics of the Peruvian Ministry of Agrarian Development and Risk (Midagri, 2021). The potential for cellulose production was calculated with the following figures: between 40 % and 45 % in sugarcane (Singh et al., 2022), 35 % in coffee husk (Janissen and Huynh, 2018), 40.5 % in cassava husk (Widiarto et al., 2019), between 12 % and 59 % in banana husk (Tibolla et al., 2019), 35 % in cocoa husk (Lubis et al., 2018), between 33 % and 40 % in rice husk (Gao et al., 2018), and 33 % oil palm stalk (Neyra-Vasquez et al., 2022).

implementing sustainable practices and achieving a more sustainable future in the agro-industrial sector.

While the primary focus of this study is on the extraction of cellulose for biodegradable packaging, recognizing the broader potential of agro-industrial waste can contribute significantly to sustainability efforts in the region. In addition to cellulose extraction, the study recommends exploring alternative waste valorization strategies for agro-industrial waste to maximize its potential. For instance, sugarcane bagasse and rice husks can be processed for biochar for soil enrichment or for bioenergy, such as biofuels, or biogas. Cassava peels, rich in starch, can be processed for bioplastics or for biogas production. Coffee and cocoa husks, which contain bioactive compounds, can be utilized in the pharmaceutical and cosmetic sectors, adding value to these by-products. Bananas peels, in addition, can be processed for use in animals' supplements, or in pectin extraction for use in foods. The implementation of such options would enhance resource efficiency, create new economic opportunities, and significantly reduce environmental impacts, towards a more sustainable and circular agro-industrial economy in the region.

Conclusions

This research presents a method to manage solid waste in the agro-industry by quantifying the waste from seven crops and estimating the potential cellulose yield for biodegradable packaging.

It highlights the opportunity to reduce environmental impact and foster sustainable businesses through effective waste utilization, particularly for cellulose extraction.

Despite some waste reuse practices, the study identifies issues related to the disposal of non-reusable waste and variable energy use, particularly among smaller firms. It suggests the need for standardized waste management and specialized training programs to improve practices in small and medium-sized enterprises.

Acknowledgments

This study was funded by the National University of Ucayali FOCAM (463-2021-UNU-R).

References

- Ahmad, A.; Imran, A.; Nadeem, R.; Islam, F.; Naz, S. and Suleria, H. (2024). Extraction of protein and polyphenols from agro-industrial waste through eco-innovative technologies. *Innovations in Engineering and Food Science*, 263-277. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-0819-6.ch010>
- Dadi, D., Daba, G., Beyene, A., Luis, P., & Van der Bruggen, B. (2019). Composting and co-composting of coffee husk and pulp with source-separated municipal solid waste: a breakthrough in valorization of coffee waste. *International journal of recycling of organic waste in agriculture*, 8, 263-277. <https://doi.org/10.1007/s40093-019-0256-8>
- DRA Ucayali. (2020). Dirección Regional de Agricultura Ucayali. Dirección Regional de Agricultura Ucayali. <https://www.gob.pe/regionucayali-drsa>
- Ekop, I. E.; Simonyan, K. J. and Ewrierhoma, E. T. (2019). Utilization of cassava wastes for value added products: An overview. *International Journal of Scientific Engineering and Science*, 3(1), 31-39. <http://ijses.com/wp-content/uploads/2019/01/171-IJSES-V3N1.pdf>
- FAO. (2022). Technical platform on the measurement and reduction of food loss and waste. <https://www.fao.org/platform-food-loss-waste/flw-data/en/>
- FAO. (2023). *The State of Food and agriculture 2023. Revealing the true cost of food to transform agrifood systems*. Rome: FAO. <https://doi.org/10.4060/cc7724en>
- Gao, Y.; Guo, X.; Liu, Y.; Fang, Z.; Zhang, M.; Zhang, R.; You, L.; Li, T. and Liu, R. H. (2018). A full utilization of rice husk to evaluate phytochemical bioactivities and prepare cellulose nanocrystals. *Scientific Reports*, 8(1), 10482. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27635-3>
- Janissen, B. and Huynh, T. (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.001>
- Kouser, R.; Bharti, A.; Azam, R.; Pathania, D. and Kothari, R. (2024). Microbe-assisted agro-industrial waste valorisation for green energy generation: A sustainable biorefinery approach. In P. Verma (ed.), *Industrial Microbiology and Biotechnology* (pp. 493-514). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-1912-9_21
- Lubis, M.; Gana, A.; Maysarah, S.; Ginting, M. H. S. and Harahap, M. B. (2018). Production of bioplastic from jackfruit seed starch (*Artocarpus heterophyllus*) reinforced with microcrystalline cellulose from cocoa pod husk (*Theobroma cacao* L.) using glycerol as plasticizer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309, 012100. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012100>
- Marew, L.; Meheret, F. and Asmare, B. (2024). Effect of processed coffee husk on feed intake, nutrient digestibility, body weight changes and economic feasibility of Bonga sheep fed on natural pasture hay as a basal diet. *Veterinary Medicine and Science*, 10(6), e70118. <https://doi.org/10.1002/vms3.70118>
- Midagri. (2025). Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias. <https://siea.midagri.gob.pe/portal/>
- Mora-Villalobos, J. A.; Aguilar, F.; Carballo-Arce, A. F.; Vega-Baudrit, J. R.; Trimino-Vázquez, H.; Villegas-Peñaranda, L. R.; Stöbener, A.; Eixenberger, D.; Bubenheim, P.; Sandoval-Barrantes, M. and Liese, A. (2023). Tropical agroindustrial biowaste revalorization through integrative biorefineries - review part I: Coffee and palm oil by-products. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(2), 1469-1487. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01442-9>
- Morales-Martínez, J. L.; Aguilar-Uscanga, M. G.; Bolaños-Reynoso, E. and López-Zamora, L. (2021). Optimization of chemical pretreatments using response surface methodology for second-generation ethanol production from coffee husk waste. *BioEnergy Research*, 14(3), 815-827. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10197-6>
- Neyra-Vásquez, J. Y.; Panduro-Pisco, G.; Díaz-Zúñiga, E. J. and Iannaccone, J. (2022). Caracterización física y química: biomasa residual de la palma (*Elaeis guineensis* Jacq.) en la

- Amazonia peruana. *Agronomía Mesoamericana*, 33(3), 48170. <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.48170>
- Panduro Pisco, G. (2021). *Diagnóstico de la diversidad biológica de la región Ucayali 2021-2028*. Pucallpa.
- Samraj, S., Senthilkumar, K., and Balaji, D. (2022). Organic Materials Valorization: Agro-Waste in Environmental Remediation, Phytochemicals, Biocatalyst and Biofuel Production. *Handbook of Biomass Valorization for Industrial Applications*, 267-286. <https://doi.org/10.1002/9781119818816.ch12>
- Singh, R. V.; Sharma, P. and Sambyal, K. (2022). Application of sugarcane bagasse in chemicals and food packaging industry: Potential and challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2, 1479-1500. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00167-9>
- Spada, J. C.; Jasper, A. and Tessaro, I. C. (2020). Biodegradable cassava starch based foams using rice husk waste as macro filler. *Waste and Biomass Valorization*, 11, 4315-4325. <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00776-w>
- Tibolla, H.; Pelissari, F. M.; Martins, J. T.; Lanzoni, E. M.; Vicente, A. A.; Menegalli, F. C. and Cunha, R. L. (2019). Banana starch nanocomposite with cellulose nanofibers isolated from banana peel by enzymatic treatment: *In vitro* cytotoxicity assessment. *Carbohydrate Polymers*, 207, 169-179. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.11.079>
- Toscano Miranda, N.; Lopes Motta, I.; Maciel Filho, R. and Wolf Maciel, M. R. (2021). Sugarcane bagasse pyrolysis: A review of operating conditions and products properties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111394. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111394>
- Widiarto, S.; Pramono, E.; Suharso; Rochliadi, A. and Arcana, I. M. (2019). Cellulose nanofibers preparation from cassava peels via mechanical disruption. *Fibers*, 7(5), 44. <https://doi.org/10.3390/fib7050044>
- Xu, Q.; Ji, T.; Gao, S. J.; Yang, Z. and Wu, N. (2018). Characteristics and applications of sugar cane bagasse ash waste in cementitious materials. *Materials*, 12(1), 39. <https://doi.org/10.3390/ma12010039>

Pronóstico para la producción de cebolla de rama a partir de un modelo VAR

Forecast scallion production based on a VAR model

Carlos Andrés Chaparro Arias ^{1,2}, Juan Carlos Ruiz Torres ^{1,3}, Gina Paola Fonseca Cifuentes ^{1,4}.

¹Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja, Colombia. ²  chaparroarias@uptc.edu.co; ³  juan.ruiz@uptc.edu.co;

⁴  gina.fonseca01@uptc.edu.co



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.115618>

2024 | 73-1 p 82-91 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-07-07 Acep.: 2025-01-08

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo de pronóstico VAR (modelo vectorial autorregresivo) para la producción de cebolla de rama con datos del municipio de Aquitania, Boyacá (Colombia), a partir de métodos de series temporales multivariadas. La metodología ha incluido la materialización de fases de estudio de acuerdo con el método de Box-Jenkins y la aplicación de una serie de pruebas estadísticas de estacionariedad Phillips-Perron, raíz unitaria Dickey-Fuller aumentada (ADF), pruebas de normalidad de Jarque-Bera, test de Phillips-Ouliaris y prueba de causalidad de Granger, entre otras. Los resultados de este estudio confirman que el modelo VAR es una herramienta efectiva para la planificación de la producción y el área cosechada de cebolla de rama. Su capacidad predictiva facilita la toma de decisiones estratégicas, lo cual optimiza la gestión agrícola.

Palabras clave: área de campo, cebolla, modelización de los cultivos, producción, producto básico.

Abstract

This work aims to develop a VAR - forecast model for scallion production with data from the municipality of Aquitania, Boyacá (Colombia), using multivariate time series methods. The methodology included the implementation of study phases in accordance with the Box-Jenkins method, as well as the application of a series of statistical tests, including the Phillips-Perron stationarity test, the augmented Dickey-Fuller (ADF) unit root test, the Jarque-Bera normality test, the Phillips-Ouliaris test, the Granger causality test, among others. The results of this study confirm that the VAR model is an effective tool for planning the production and harvested area of scallion. Its predictive capacity facilitates strategic decision-making, optimizing agricultural management.

Keywords: Commodities, crop modelling, farm area, scallion, production.

Introducción

Eventos como la globalización de los mercados, las cadenas de valor, la celeridad en las innovaciones tecnológicas e institucionales, las limitaciones ambientales y el incremento de los precios de bienes agrícolas han ocasionado que la agricultura regrese a la agenda mundial y, por ende, al desarrollo económico de los países; estos hechos reconocen la multiplicidad de funciones que ejerce el sector, entre las que se encuentran, además del crecimiento económico, la disminución de la pobreza y el hambre, la sostenibilidad ambiental y la equidad y seguridad alimentaria (Naciones Unidas, 2021; Perfetti *et al.*, 2013).

Los productores agrícolas se enfrentan a diversas amenazas, entre las que se destacan la volatilidad del sector, las fluctuaciones de precios y los efectos del cambio climático, que generan incertidumbre en la producción y el suministro de alimentos. Estas condiciones adversas impactan tanto la actividad económica real como los mercados financieros, lo cual provoca inestabilidad en los precios (Chen *et al.*, 2023). En este contexto, la reducción en la producción, derivada de los cambios en la temperatura y la variabilidad climática, representa un riesgo significativo, especialmente en regiones de bajos ingresos. Para mitigar estas pérdidas, es fundamental implementar estrategias que fortalezcan la resiliencia del sector, promoviendo políticas e inversiones orientadas a reducir la vulnerabilidad y garantizar la estabilidad en la oferta. De lo contrario, el incremento en los costos de producción se trasladará al precio final para el consumidor, lo que afecta el acceso a los alimentos y la seguridad alimentaria en general (Antunes de Araujo *et al.*, 2020; Baffes y Kabundi, 2023; Ding y Xu, 2023).

En tal sentido, los *commodities* se identifican como mercados en crecimiento que incluyen productos agrícolas fundamentales para la alimentación de las personas y, por lo tanto, materias primas necesarias en los procesos industriales (Antunes de Araujo *et al.*, 2020; Ouyang y Zhang, 2020). Es así que los *commodities* agrícolas provienen principalmente de actividades primarias (Michail y Melas, 2020) y de economías con un menor nivel de desarrollo, cuyo consumo se lleva a cabo casi inmediatamente luego de un limitado proceso de transformación (Del Giorgio *et al.*, 2022). En el caso colombiano la participación agrícola tiene relevancia en la economía, ya que es un sector generador de empleo e ingresos para la población económicamente activa. Sin embargo, es afectado, entre otros, por factores económicos, políticos, sociales y ambientales (Fonseca-Cifuentes *et al.*, 2021).

En el caso del modelo vectorial autorregresivo (VAR), se explica como una técnica utilizada para realizar pronósticos en sistemas con múltiples series temporales interrelacionadas (Li y Umair, 2023). Este

enfoque es especialmente útil cuando, al menos, 2 series temporales influyen entre sí, lo que implica una relación bidireccional entre las variables analizadas (Sujath *et al.*, 2020).

El modelo VAR ha sido utilizado con éxito en diversos estudios sobre la determinación de precios de alimentos básicos. Firmansyah *et al.* (2023) compararon el modelo VAR con el modelo de corrección de errores vectoriales (VECM) para modelar los precios de la carne de vacuno en varias provincias de las islas de Sumatra, Java, Bali y Nusa Tenggara. Por su parte Sumertajaya *et al.* (2024) desarrollaron un modelo de pronóstico de precios de productos alimenticios en Indonesia, aplicando el agrupamiento de series temporales multivariadas y el método de imputación autorregresiva de vectores promedio móvil (VAR-IMMA).

En la apicultura, un estudio en Sicilia (sur de Italia) monitoreó colmenas en 3 lugares distantes para analizar las interrelaciones entre factores internos (peso, temperatura, humedad y nivel de presión sonora) y parámetros ambientales internos y externos (temperatura, humedad, lluvia, viento e índice UV). Utilizando un modelo VAR se identificó una relación significativa entre el peso de la colmena, su temperatura interna y su humedad relativa, lo cual permitió construir un modelo predictivo para comprender la posibilidad de intervención en las colmenas (Bono *et al.*, 2024).

De tal manera que este artículo tiene como objetivo desarrollar un modelo de pronóstico VAR para la producción y el área cosechada de cebolla de rama, mediante la aplicación de métodos de series temporales multivariadas. Para ello, se analizó la información histórica registrada en la Red de Información del Sector Agropecuario desde el segundo semestre de 2006 hasta el segundo semestre de 2022, enfocándose en el municipio de Aquitania, Boyacá. Este municipio es el principal productor de cebolla de rama en Colombia, involucra a la mayor parte de su población y aporta aproximadamente el 70 % de los ingresos de la economía local. Con una siembra anual promedio de 3800 hectáreas y una producción de 100 750 toneladas, Aquitania ocupa el primer lugar en producción dentro del departamento de Boyacá, junto con la producción de papa (Alcaldía Municipal Aquitania, 2020).

Materiales y métodos

Datos

La información del cultivo de cebolla de rama del municipio de Aquitania, Boyacá, proviene de las evaluaciones agropecuarias (EVA) y del Anuario Estadístico del Sector Agropecuario (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024), los cuales consideran las variables de área cosechada y

producción. Los datos fueron procesados mediante el *software* R Studio versión 4.3.1., en el cual fueron consideradas 6 variables categorizadas, como se muestra la Tabla 1.

Métodos y pruebas estadísticas

El modelo fue desarrollado de acuerdo con la metodología Box-Jenkins (Figura 1) y materializado a partir de 4 etapas: a) identificación del modelo, b) estimación de los parámetros, c) diagnóstico del modelo basado en residuos y, d) generación de las predicciones.

Para el análisis se han considerado inicialmente las siguientes hipótesis como base para la determinación de los supuestos del modelo con un nivel de significancia del 5 %:

H_0 : la serie temporal se considera no estacionaria porque mantiene raíz unitaria mayor al nivel de significancia.

H_1 : la serie temporal se considera estacionaria menor al nivel de significancia.

A partir de estas, posteriormente se realizan las pruebas de estacionariedad Phillips-Perron y la raíz unitaria Dickey-Fuller aumentada (ADF). La prueba de estacionariedad de Phillips y Perron (1988) se utiliza en el análisis de series de tiempo para evaluar la hipótesis nula de que una serie está integrada, es decir, que posee una raíz unitaria y sigue una caminata aleatoria (raíz unitaria). De tal manera, asume que el proceso de generación de Y_i sigue un orden superior de autocorrelación admitido por la ecuación de prueba, ocasionando que Y_{t-1} sea de carácter endógeno, realizando correcciones no paramétricas

Tabla 1. Variables de estudio según evaluación agropecuaria por consenso

Tipo de variable	Nombre de la variable	Descripción
Cualitativa	Periodo	A (primer semestre) y B (segundo semestre).
Cuantitativa	Área sembrada (Ha)	Superficie en hectáreas (Ha) donde se ha realizado la siembra de un cultivo, sin importar si ha germinado o alcanzado su etapa de producción.
Cuantitativa	Área cosechada (Ha)	Extensión de la cual se obtiene la producción en hectáreas (Ha).
Cuantitativa	Producción (t)	Volumen obtenido, en toneladas (t), del área cosechada.
Cuantitativa	Rendimiento (t/Ha)	Toneladas (t) obtenidas por hectárea de cultivo (Ha).

Fuente: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2024

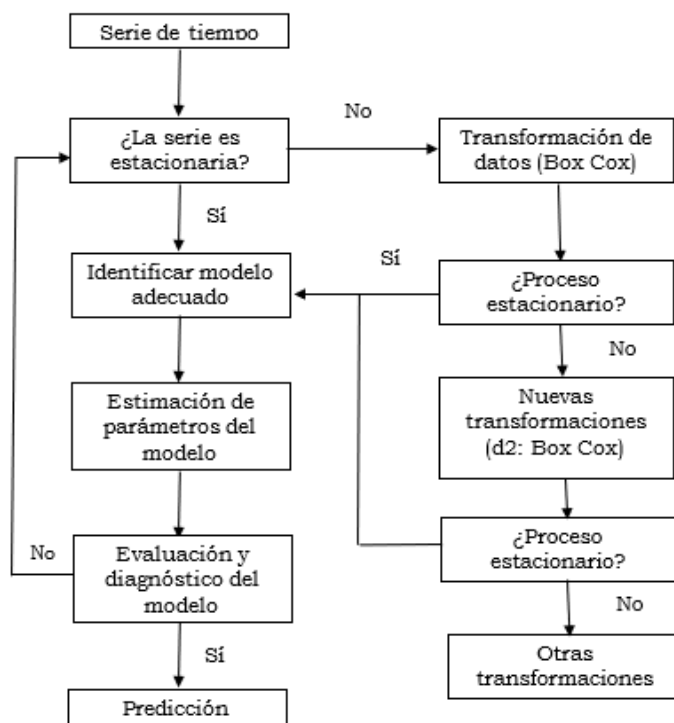


Figura 1. Metodología Box-Jenkins. Fuente: Uribe et al. (2017).

en el estadístico de prueba e invalidando la prueba de Dickey-Fuller (Meneses-Cerón y Pérez-Pacheco, 2020). Por tanto, la raíz unitaria es un caso de no estacionariedad, en el que la serie temporal tiene una tendencia estocástica persistente en el tiempo.

Una vez con los resultados, se ha establecido la prueba de causalidad a partir de las siguientes hipótesis:

H_0 : el tipo de producción no es causal en el sentido Granger (sirve para predecir); el área cosechada (Ha) de la cebolla de rama de forma semestral es mayor al nivel de significancia.

H_1 : el tipo de producción sí es causal en el sentido Granger (sirve para predecir); el área cosechada (ha) de la cebolla de rama de forma semestrales menor al nivel de significancia.

La prueba de causalidad de Granger es una prueba de hipótesis estadística con el fin de establecer si la serie de tiempo es útil para el pronóstico de otra y permite responder preguntas como ¿los cambios en Y_1 causan cambios en Y_2 ? ¿puede el pasado de Y_1 mejorar la predicción futura de Y_2 ? (causalidad bidireccional); ¿el conocimiento del futuro de Y_1 ayuda en el mejoramiento de la predicción de Y_2 ? (causalidad instantánea). Luego, para la selección del modelo y a partir del test de Phillips-Ouliaris, se han incluido las siguientes hipótesis, con el propósito de identificar si la serie temporal permite cointegraciones.

H_0 : la serie temporal no permite cointegración de las variables.

H_1 : la serie temporal sí permite cointegración de las variables.

Supuestos del modelo

A partir de la prueba de estacionariedad presentada en la Tabla 2 se validan las hipótesis. De acuerdo con los criterios de las pruebas estadísticas de estacionariedad (Phillips-Perron) y raíz unitaria (Dickey-Fuller), para la variable *área cosechada* los resultados son menores a 0.05, por lo cual se acepta la hipótesis alterna con un 95 % de confianza, ya que los datos siguen un comportamiento estacionario. Igualmente para el caso de la producción las pruebas estadísticas, son mayores a 0.05, por lo cual se acepta la hipótesis nula con un 95 % de confianza, ya que los datos no siguen un comportamiento estacionario.

Tabla 2. Resultados de prueba de estacionariedad y raíz unitaria

Test	Phillips-Perron	Dickey-Fuller
Función	ur.pp	ur.df
Criterio estadístico	p-value	p-value
Producción	0.758	9.029e-06
Área cosechada	0.01711	0.006218

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Selección del modelo

Luego, a partir de la teoría de la cointegración se establece que, aunque las series originales sean no estacionarias, puede que existan combinaciones lineales de equilibrio entre estas que mantengan el carácter estacionario (a estas relaciones de largo plazo se les denomina relaciones de cointegración). En los modelos VEC (vector de correlación de errores) se intenta establecer un marco único con la integración de las relaciones de largo plazo estacionarias (reunidas a través de relaciones de cointegración) junto con las dependencias dinámicas de corto plazo conseguidas a través de modelos VAR (Novales, 2017).

De esta manera la generación del modelo ha considerado: a) identificación del número de rezagos, b) test de Phillips-Ouliaris, c) identificación del número de relaciones de cointegración.

Identificación del número de rezagos

El número de rezagos sugeridos y su criterio de selección se encuentran en la Tabla 3.

El modelo ha considerado el criterio de información Hannan-Quinn (HQ), que es una medida de bondad de ajuste del modelo estadístico, utilizada en la selección de un modelo frente a un conjunto finito de estos. De este modo, la medida introduce un término de penalización para el número de parámetros, de tal forma que, dados dos modelos estimados, el modelo con menor valor en HQ es preferido, lo que implica un número menor de variables explicativas, mejor ajuste o ambos elementos. Puede ser utilizado en la comparación de los modelos estimados cuando los valores numéricos de la variable dependiente son idénticos para que todas las estimaciones sean comparadas (Kamila, 2022). De esta manera el orden del VEC corresponde siempre a uno menos que el VAR (Novales, 2017), por tanto, y de acuerdo con los resultados para el desarrollo del modelo, se inicia con 1.

Test de Phillips-Ouliaris

Posteriormente se establece el cálculo del estadístico $Z(\alpha)$ de Phillips-Perron para una raíz unitaria en los residuos de la regresión de cointegración. La raíz unitaria se estima a partir de una regresión de la

Tabla 3. Rezagos sugeridos identificados

Indicador	Rezagos	Criterio
Akaike (AIC)	1	2.753201e+01
Hannan-Quinn (HQ)	1	2.761928e+01
Schwartz (SC)	1	2.781748e+01
Error de predicción final (FPE)	1	9.072289e+11

Fuente: elaboración propia.

primera variable (columna) de X sobre las restantes variables de x sin constante y con tendencia lineal. Para estimar la varianza se utiliza el estimador de Newey-West. Si la estadística calculada está fuera de la tabla de valores críticos, se genera un mensaje de advertencia. Una vez con los resultados $p\text{-value}=0.07275$ se acepta la hipótesis nula, es decir, la serie temporal no permite cointegración de las variables.

Identificación del número de relaciones de cointegración

En esta etapa se establece el número de relaciones de cointegración independientes, o de largo plazo, existente entre las variables. A este número se le denomina *rango de cointegración*. En general, si se tiene n series no estacionarias el rango de cointegración puede oscilar entre los valores 0, 1, ..., $n - 1$ (Novales, 2017). Se ha estimado un VECM mediante el cual se ha incluido una tendencia determinística en la relación de cointegración. Es así como en la primera y segunda hipótesis nula $r = 0$ y $r \geq 1$, dado que el estadístico de prueba 4.78 y 3.84 no excede todos los valores críticos, la primera y segunda hipótesis no se pueden rechazar. Por lo tanto, la cointegración se encuentra $r = 0$ y $r \leq 1$ bajo estadísticas de valores propios máximos (Tabla 4).

Validación del modelo

Para el proceso de discusión y validación del modelo se han realizado las pruebas de normalidad, pruebas de autocorrelación serial, prueba de impulso respuesta, descomposición de la varianza de error de pronóstico (FEVD), prueba de cointegración Phillips-Ouliaris, prueba de homocedasticidad y prueba de causalidad de Granger.

Prueba de normalidad

Esta prueba ha considerado los criterios de la prueba Jarque-Bera, utilizada para contrastar la hipótesis de normalidad en una muestra de datos con media y varianza desconocida (Glinskiy et al., 2024). Dicha prueba se basa en el análisis de la asimetría (medición de la menor o mayor simetría de la distribución existente entre 2 medidas) y la curtosis (medición de la mayor o menor concentración de datos alrededor de la media), lo que permite determinar la irregularidad de la distribución (Malá et al., 2021). Para ello han sido consideradas las siguientes hipótesis:

H_0 : los residuales del modelo se distribuyen normalmente $P - \text{valor} > 0.05$. No se rechaza.

H_1 : los residuales del modelo no se distribuyen normalmente $P - \text{valor} < 0.05$. No se acepta la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

De acuerdo con los resultados de la prueba de normalidad en la Tabla 5, se acepta la hipótesis alterna: los residuales del modelo no se distribuyen normalmente.

Adicional a las pruebas cuantitativas se realizaron figuras para visualizar la distribución. En la Figura 2 se identifica la independencia de los residuos. Si el $p\text{-value}$ obtenido es pequeño esto indica que no existe aleatoriedad, en cambio, cuanto mayor es su $p\text{-valor}$ más evidencia hay de que los residuos son ruido blanco. Para que un modelo sea válido, los diferentes análisis sobre los residuos obtenidos en la estimación deben ser ruido.

Pruebas de autocorrelación serial

La media y la varianza desempeñan un papel importante en el estudio de distribuciones estadísticas, ya que incluyen 2 propiedades distributivas clave: la ubicación central y la dispersión.

Por tanto, el criterio de decisión se especifica, en el sentido de rechazar la hipótesis nula, si el valor de la probabilidad es menor al nivel de significancia (Morán-Chiquito, 2014), de este modo se establece:

H_0 : los residuales del modelo no están correlacionados. No se rechaza.

H_1 : los residuales del modelo sí están correlacionados. No se acepta la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Es así como los resultados $p\text{-value}$ son menores a 0.05, lo que indica que los residuales del modelo, están correlacionados, por tanto, se acepta la hipótesis alternativa, los residuales, no están correlacionados, como se aprecia en la Figura 2.

Prueba de impulso-respuesta

Esta prueba es un instrumento útil para evaluar la congruencia y la sensibilidad dinámica de las variables especificadas en el modelo, por tal razón, es eficiente para evaluar y proponer políticas económicas. Las funciones generalizadas de impulso-respuesta (FGIR) permiten establecer la respuesta dinámica de una

Tabla 4. Test de Phillips-Ouliaris

r	Test 1	1 %	5 %	10 %
≤ 1	3.84	12.97	9.24	7.52
$= 0$	4.78	20.20	15.67	13.75

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Resultados de la prueba de normalidad

Test	Normalidad
Criterio estadístico	$p\text{-value}$
JB-Test (multivariate)	0.01775
Skewness only (multivariate)	0.01054
Kurtosis only (multivariate)	0.2415

Fuente: elaboración propia.

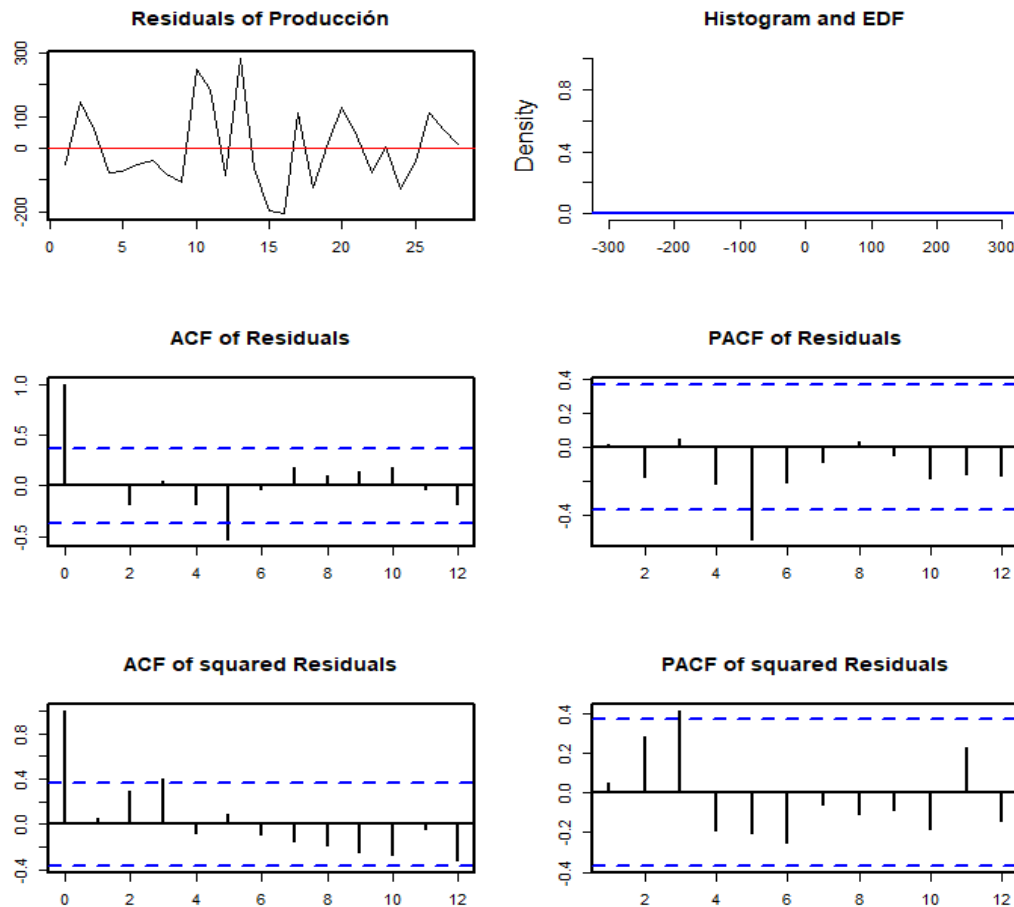


Figura 2. Residuales del modelo EDF (función de distribución empírica), ACF (función de autocorrelación), PACF (función de autocorrelación parcial).
Fuente: elaboración propia.

determinada variable del sistema ante choques (o cambios no anticipados) en alguna otra variable (Morán-Chiquito, 2014). De esta manera el análisis de respuesta al impulso se basa en la representación de la media móvil mundial del proceso VAR(p). Por tanto, la prueba fue aplicada entre todas las variables, evidenciando que responden a los estímulos generados por las demás variables, situación que se puede apreciar en la Figura 3.

Descomposición de la varianza FEVD

La descomposición de la varianza indica la cantidad de información que cada variable aporta a las otras variables en la autorregresión. Además, determina cuánto de la varianza del error de pronóstico de cada una de las variables puede explicarse por choques exógenos a las otras variables. De igual forma, las descomposiciones de varianzas establecen en qué medida (o en qué porcentaje) una variable es influida por innovaciones en otra variable (Cuevas-Ahumada, 2008).

En la Figura 4 se descompone la varianza, lo que en términos generales redunda en el grado de incidencia de esta en las diferentes variables. En el

caso de la producción total acumulada a lo largo de los distintos periodos, su variabilidad es inherente a la propia variable. Asimismo, a lo largo del tiempo se observa cuantitativamente la influencia de la variable *área cosechada*, lo cual evidencia su incidencia en la dinámica productiva.

Prueba de cointegración Phillips-Ouliaris

En la hipótesis nula de la no cointegración se encuentra una lenta tasa de convergencia de las estadísticas de prueba (Reimers, 1992). De esta manera:

H_0 : las series no son cointegradas. No se rechaza.

H_1 : las series sí son cointegradas; existe evidencia para sostener que las series son cointegradas, es decir, que hay una tendencia a largo plazo. No se acepta la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa.

Los resultados permiten establecer un valor de $p\text{-value} = 0.07275$, por lo que no hay evidencia para el rechazo de la hipótesis nula de las series cointegradas, es decir, mantienen una tendencia de largo plazo.

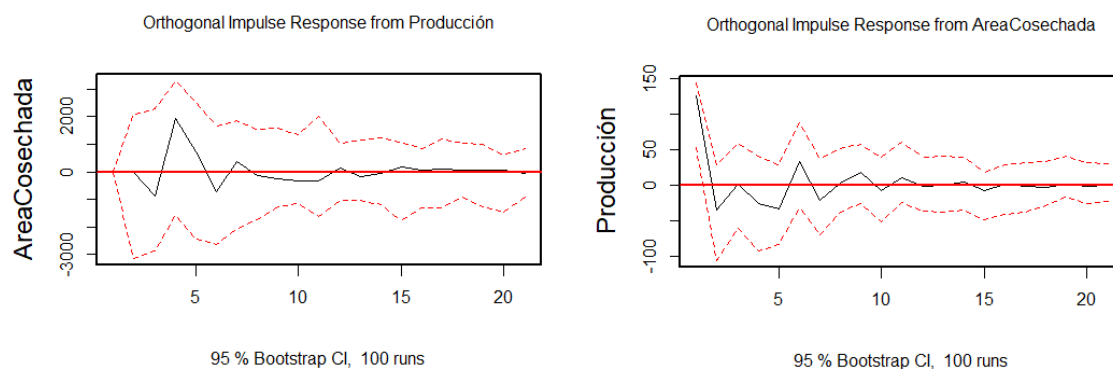


Figura 3. Test impulso-respuesta de la producción y área cosechada. Fuente: elaboración propia.

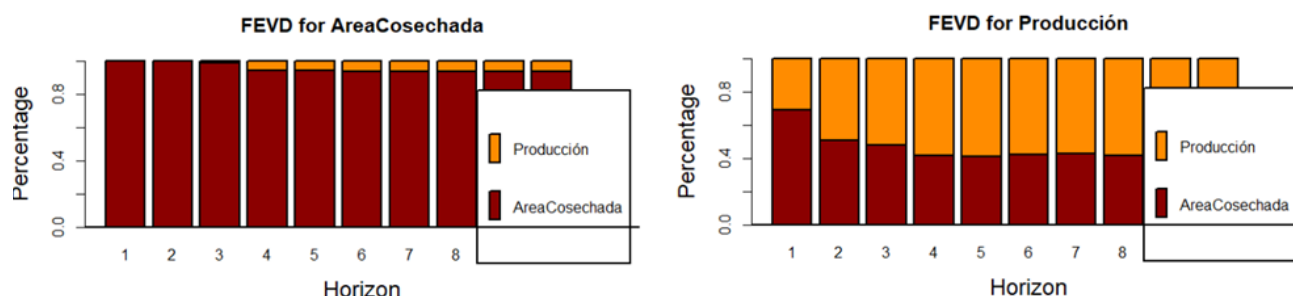


Figura 4. Descomposición de la varianza (FEVD). Fuente: elaboración propia.

Prueba de homocedasticidad

El supuesto de homogeneidad de varianzas, también conocido como homocedasticidad, considera que la varianza es constante (no varía) en los diferentes niveles de un factor. Los resultados arrojaron valores de $p\text{-value} = 0.00558$.

Prueba de causalidad de Granger

El concepto de causalidad de Granger se ha utilizado ampliamente para estudiar las relaciones dinámicas entre series temporales económicas. Este concepto probabilístico se define en términos de previsibilidad y explora la dirección del flujo del tiempo para lograr un ordenamiento causal de las variables dependientes en series temporales multivariadas (Eichler, 2012). Entonces, se establece que:

H_0 : la serie de tiempo x no Granger-causa la serie de tiempo y y no se rechaza.

H_1 : la serie de tiempo x Granger-causa la serie de tiempo.

Los resultados permiten establecer un valor de $p\text{-value} = 0.0006032$. En consecuencia, se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que el crecimiento semestral de la producción causa en el sentido de Granger al crecimiento del área cosechada durante

el periodo de estimación del estudio. Como aparece en la Figura 5, no parece existir ruptura en los respectivos intervalos de confianza.

Finalmente, en la Tabla 6 se realiza el pronóstico del modelo VAR para los 3 años siguientes, con un nivel de confianza del 95 %; la estimación incluye el área cosechada y la producción para ambos semestres del año. De esta manera se obtiene una herramienta que facilita la modelización del comportamiento de la producción y se proporciona información relevante para la toma de decisiones en el sector agropecuario (Naciones Unidas, 2021).

Discusión

En esta investigación inicialmente se analizaron aspectos conceptuales relacionados con la producción del commodity cebolla de rama, a partir de autores como Chen *et al.* (2023), Antunes de Araujo *et al.* (2020), Ding y Xu (2023), y Ouyang y Zhang (2020). Posteriormente, para la construcción del modelo, se utilizó información sobre el cultivo de cebolla de rama en el municipio en estudio, la cual fue obtenida de las evaluaciones agropecuarias (EVA) y del anuario estadístico del sector. Asimismo, se aplicó la metodología Box-Jenkins (Uribe *et al.*, 2017) mediante un conjunto de pruebas estadísticas, incluidas las

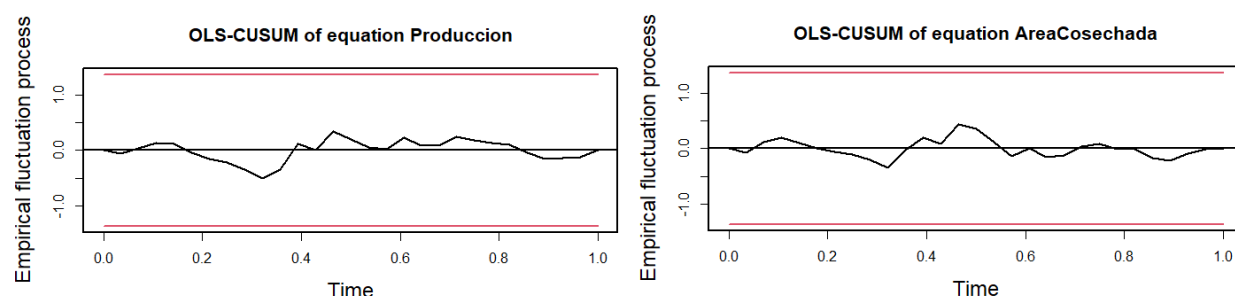


Figura 5. Ruptura estructural de los residuos (prueba de estabilidad OLS-CUSUM). Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Pronóstico área cosechada y producción

Período de proyección (año/semestre)	Área cosechada (ha)	Producción (t)
1A	1283	59 707
1B	1297	61 309
2A	1202	59 050
2B	1193	59 149
3A	1274	62 754
3B	1272	60 756

pruebas de estacionariedad de Phillips-Perron, la prueba de raíz unitaria Dickey-Fuller aumentada (ADF), la prueba de normalidad de Jarque-Bera, el test de Phillips-Ouliaris y la prueba de causalidad de Granger.

Esto permitió desarrollar un modelo de pronóstico para series de tiempo orientado a estimar la producción de cebolla de rama en toneladas e identificar las variables que inciden en la mejora del área cosechada. El modelo desarrollado permitirá proyectar, tanto el área de cosecha, como la producción de la cebolla de rama o junca en periodos semestrales, además de establecer mecanismos para el aseguramiento de las cosechas y su adecuada recolección. Asimismo, es fundamental considerar la variable climática, debido a los cambios que impactan de manera sistemática los aspectos socioeconómicos y productivos a nivel global.

Los pronósticos de rendimiento de los cultivos son fundamentales para evaluar las pérdidas potenciales y reales de alimentos, lo que permite a Gobiernos y productores diseñar estrategias efectivas en materia de exportación e importación, seguridad alimentaria y gestión sostenible de la tierra (White *et al.*, 2020). La capacidad de pronosticar los rendimientos finales de los cultivos, tanto en etapas previas, como durante el periodo de crecimiento, se constituyen en una herramienta clave para los agricultores, ya que les brinda la oportunidad de planificar anticipadamente para la toma de decisiones (Filippi *et al.*, 2019).

De igual manera, en el sector agropecuario, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), han cobrado relevancia en la investigación académica, pues se han convertido en un eje central para el análisis de los desafíos globales. Entre estos se destacan el cambio climático, la inseguridad política, la inestabilidad de los mercados y la seguridad alimentaria (Brunori *et al.*, 2016; Camara *et al.*, 2025; Galli *et al.*, 2020). En particular, en el sector agrícola, los ODS 2 (Hambre cero) y 12 (Producción y consumo sostenibles), abordan desafíos clave relacionados con la sostenibilidad ambiental, la seguridad alimentaria y el cambio climático, a la vez que promueven la mejora de los sistemas acuáticos y terrestres (FAO, 2020).

El análisis de modelos de pronósticos en la producción agropecuaria cuenta con antecedentes en estudios como el de Luis-Rojas *et al.* (2020), quienes desarrollaron un modelo basado en la metodología Box-Jenkins y fundamentada en procesos autorregresivos integrados de medias móviles (ARIMA), para estimar la producción anual de vainilla en México. Los resultados de su investigación permitieron proyectar la producción del año siguiente y generar información clave para la planificación y toma de decisiones en un horizonte de 6 años.

La investigación de Mohale y Obagbuwa. (2024) utilizó el método estadístico (VAR) para analizar cómo las variables climáticas interactúan entre sí e influyen en el rendimiento del trigo en Bloemfontein, Sudáfrica. Este modelo extiende el concepto de autorregresión univariante a un enfoque multivariable, lo que permite modelar el comportamiento conjunto del sistema en lugar de examinar cada variable de manera aislada. Este enfoque resulta particularmente valioso para examinar cómo la temperatura, la precipitación y otros factores climáticos interactúan y contribuyen a las fluctuaciones del rendimiento. Su principio fundamental radica en que cada variable está influenciada por los valores pasados en las demás variables del sistema, de este modo, se pueden capturar relaciones dinámicas y efectos de retroalimentación entre el clima y la producción de trigo. Al considerar estas interdependencias, el modelo VAR proporciona una visión integral del comportamiento del sistema. El orden de rezago

determina cuántos periodos anteriores se consideran para predecir valores actuales de las variables. Para seleccionar el orden del rezago óptimo se emplean criterios como la información de Akaike (AIC) y el criterio de información bayesiano (BIC), los cuales ayudan a equilibrar la complejidad del modelo y su precisión predictiva; además, el análisis de los gráficos de funciones de respuesta al impulso (IRF) y de la descomposición de la varianza (FEVD) proporciona información clave sobre las interacciones dinámicas y la importancia relativa de las variables climáticas en la incidencia del rendimiento del trigo.

Por otra parte, en Malasia, Bilal *et al.* (2024) integraron modelos (VAR) con modelos difusos basados en números trapezoidales, estableciendo nuevos enfoques multivariados de series temporales difusas (MFTS), específicamente modelos autorregresivos vectoriales difusos (FVAR). La integración de estos enfoques mejora el desempeño predictivo y permite una evaluación más precisa de los precios y la producción de arroz. Los resultados del estudio indican que la mayor precisión en los pronósticos obtenidos con los modelos FVAR y números difusos trapezoidales (TrFN) pueden generar beneficios significativos para los agricultores locales y otras partes interesadas, al facilitar la toma de decisiones informadas sobre producción y precios. Además, se destaca la importancia de incorporar variables como las condiciones climáticas, la calidad del suelo, los ataques de plagas y las innovaciones tecnológicas en la agricultura, lo que contribuiría a una comprensión más integral de los factores que influyen en el mercado del arroz.

De manera similar, Hou *et al.* (2023) analizaron el pronóstico de la evapotranspiración de referencia en el estado de Penang, Malasia, empleando el modelo VAR. En su estudio examinaron la relación causal de las variables meteorológicas y determinaron que el modelo VAR ofrece un mejor desempeño en comparación con otras técnicas, como el error potencial absoluto medio (MAPE), el margen de error (ME), el error absoluto medio (MAE), el error porcentual medio (MPE), el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de correlación (CORR) y el método mínimo-máximo, para evaluar la precisión de los datos de pronóstico. Asimismo, los autores sugieren que futuras investigaciones podrían mejorar la precisión de los pronósticos mediante un enfoque híbrido que combine redes neuronales artificiales con el modelo VAR para pronosticar la evapotranspiración de referencia, utilizando diferentes combinaciones de variables meteorológicas como entrada, para aumentar la precisión de los resultados del pronóstico.

Conclusiones

Los resultados de este estudio evidencian que un modelo VAR es una herramienta útil para la planificación de la producción y el área cosechada

del commodity cebolla de rama en el municipio de Aquitania. A partir del análisis de datos históricos provenientes de las EVA, el anuario estadístico del sector y con la aplicación de la metodología Box-Jenkins se llevaron a cabo diversas pruebas estadísticas, como las de estacionariedad (Phillips-Perron, ADF), normalidad (Jarque-Bera), cointegración (Phillips-Ouliaris) y la causalidad de Granger. Estos resultados respaldan la viabilidad del modelo VAR para prever las necesidades futuras de producción, lo cual contribuye a una mejor toma de decisiones en la gestión agrícola. Asimismo, el estudio refuerza la importancia del uso de herramientas econométricas en la planificación del sector agrícola y facilita la implementación de estrategias más eficientes.

El modelo considera un histórico del área sembrada (ha), área cosechada (ha), producción (t) y rendimiento (t/ha) para el pronóstico, sin embargo, este puede verse afectado por factores externos relacionados con el clima o problemas fitosanitarios. Así mismo, el modelo puede ser de utilidad, entre otras instituciones técnicas, para la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) y para las evaluaciones agropecuarias municipales en articulación con el Sistema Nacional Unificado de Información Rural Agropecuaria (SNUIRA).

Referencias

- Alcaldía Municipal de Aquitania. (2020). *Plan de Desarrollo para el Municipio de Aquitania Boyacá "Unidos Construimos el Progreso 2020-2023."* <https://www.aquitania-boyaca.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-20202023-unidos-construimos-el-progreso-103456>
- Antunes de Araujo, F. H.; Bejan, L.; Stosic, B. y Stosic, T. (2020). An analysis of Brazilian agricultural commodities using permutation-information theory quantifiers: The influence of food crisis. *Chaos, Solitons and Fractals*, 139, 110081. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110081>
- Baffes, J. y Kabundi, A. (2023). Commodity price shocks: Order within chaos? *Resources Policy*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103640>
- Bilal, M.; Alrasheedi, M. A.; Aamir, M.; Abdullah, S.; Norrulashikin, S. M. y Rezaizy, R. (2024). Enhanced forecasting of rice price and production in Malaysia using novel multivariate fuzzy time series models. *Scientific Reports*, 14, 29903. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-77907-4>
- Bono, F.; Vallone, M.; Alleri, M.; Lo Verde, G.; Orlando, S.; Ragusa, E. y Catania, P. (2024). Hive behaviour assessment through vector autoregressive model by a smart apiculture system in the Mediterranean area. *Smart Agricultural Technology*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100676>
- Brunori, G.; Galli, F.; Barjolle, D.; Van Broekhuizen, R.; Colombo, L.; Giampietro, M.; Kirwan, J.; Lang, T.; Mathijs, E.; Maye, D.; De Roest, K.; Rougoor, C.; Schwarz, J.; Schmitt, E.; Smith, J.; Stojanovic, Z.; Tisenkopfs, T. y Touzard, J. M. (2016). Are local food chains more sustainable than global food chains? Considerations for assessment. *Sustainability*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/su8050449>
- Camara, S. B.; Zucatto, L. C.; Brandão, J. B. y Boscardin, M. (2025). Mapping of scientific production around the sustainable

- development goals-SDGS and food production. *Ciencia Rural*, 55(3). <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20230134>
- Chen, L.; Verousis, T.; Wang, K. y Zhou, Z. (2023). Financial stress and commodity price volatility. *Energy Economics*, 125, 106874. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2023.106874>
- Cuevas-Ahumada, V. M. (2008). Inflation, output and economic policy in Mexico. *Investigación Económica*, 67(265), 85-120.
- Del Giorgio, O.; Robinson, B. E. y Le Polain de Waroux, Y. (2022). Impacts of agricultural commodity frontier expansion on smallholder livelihoods: An assessment through the lens of access to land and resources in the Argentine Chaco. *Journal of Rural Studies*, 93, 67-80. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2022.05.014>
- Ding, Y. y Xu, J. (2023). Global vulnerability of agricultural commodities to climate risk: Evidence from satellite data. *Economic Analysis and Policy*, 80, 669-687. <https://doi.org/10.1016/j.eap.2023.09.013>
- Eichler, M. (2012). Graphical modelling of multivariate time series. *Probability Theory and Related Fields*, 153, 233-268. <https://doi.org/10.1007/s00440-011-0345-8>
- FAO. (2020). FAO framework for the Urban Food Agenda. En FAO framework for the Urban Food Agenda. <https://doi.org/10.4060/ca3151en>
- Filippi, P.; Jones, E. J.; Wimalathunge, N. S.; Somarathna, P. D. S. N.; Pozza, L. E.; Ugbaje, S. U.; Jephcott, T. G.; Paterson, S. E.; Whelan, B. M. y Bishop, T. F. A. (2019). An approach to forecast grain crop yield using multi-layered, multi-farm data sets and machine learning. *Precision Agriculture*, 20, 1015-1029. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-09628-4>
- Firmansyah, F.; Maruli, P. y Harahap, A. (2023). Analysis of beef market integration between consumer and producer regions in Indonesia. *Open Agriculture*, 8(1). <https://doi.org/10.1515/opag-2022-0221>
- Fonseca-Cifuentes, G.; León-Castro, E. y Blanco-Mesa, F. (2021). Predicting the future price of a commodity using the OWMa operator: An approximation of the interest rate and inflation in the brown pastusa potato price. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40(2), 1971-1981. <https://doi.org/10.3233/jifs-189200>
- Galli, F.; Prosperi, P.; Favilli, E.; D'amico, S.; Bartolini, F. y Brunori, G. (2020). How can policy processes remove barriers to sustainable food systems in Europe? Contributing to a policy framework for agri-food transitions. *Food Policy*, 96, 101871. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2020.101871>
- Glinksiy, V.; Ismayilova, Y.; Khrushchev, S.; Logachov, A.; Logachova, O.; Serga, L.; Yambartsev, A. y Zaykov, K. (2024). Modifications to the Jarque-Bera test. *Mathematics*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/math12162523>
- Hou, P. S.; Fadzil, L. M.; Manickam, S. y Al-Shareeda, M. A. (2023). Vector autoregression model-based forecasting of reference evapotranspiration in Malaysia. *Sustainability*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/su15043675>
- Kamila, K. (2022). General Hannan and Quinn criterion for common time series. *Statistics*, 56(1), 222-241. <https://doi.org/10.1080/02331888.2022.2041017>
- Li, Y. y Umair, M. (2023). The protective nature of gold during times of oil price volatility: An analysis of the Covid-19 pandemic. *Extractive Industries and Society*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2023.101284>
- Luis-Rojas, S.; Ramírez-Valverde, B.; Díaz-Bautista, M.; Pizano-Calderón, J. y Rodríguez-López, C. (2020). Vanilla (*Vanilla planifolia*) production in Mexico: Analysis and forecast. *Revista Mexicana Ciencias Agrícolas*, 11(1), 175-187. <https://doi.org/https://doi.org/10.29312/remexca.v11i1.2065>
- Malá, I.; Sládek, V. y Bílková, D. (2021). Power comparisons of normality tests based on l-moments and classical tests. *Mathematics and Statistics*, 9(6), 994-1003. <https://doi.org/10.13189/ms.2021.090615>
- Meneses-Cerón, L. Á. y Pérez-Pacheco, C. A. (2020). Análisis comparativo de eficiencia en mercados emergentes. El caso de Colombia, Chile y Perú. *Apuntes Contables*, 26, 9-24. <https://doi.org/10.18601/16577175.N26.02>
- Michail, N. A. y Melas, K. D. (2020). Market interactions between agricultural commodities and the dry bulk shipping market. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, 37, 20212073. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2020.07.003>
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2024). Reporte: Área, Producción, Rendimiento y Participación Municipal en el Departamento por Cultivo. <https://www.Agronet.Gov.Co/Estadistica/Paginas/Home.aspx?Cod=59>
- Mohale, V. Z. y Obagbuwa, I. C. (2024). Assessing the impact of climate variability on wheat yield in Bloemfontein wheat farms through time series analysis. *Edelweiss Applied Science and Technology*, 8(5), 1213-1234. <https://doi.org/10.55214/25768484.v8i5.1826>
- Morán-Chiquito, D. M. (2014). Determinantes de la inflación en Ecuador. Un análisis econométrico utilizando modelos VAR. *Economía y Sociedad*, 18(31), 53-70.
- Naciones Unidas. (2021). Innovación para el desarrollo: la clave para una recuperación transformadora en América Latina y el Caribe. www.cepal.org/apps
- Novales, A. (2017). Modelos vectoriales autorregresivos (VAR). *Universidad Complutense de Madrid*, 58.
- Ouyang, R. y Zhang, X. (2020). Financialization of agricultural commodities: Evidence from China. *Economic Modelling*, 85, 381-389. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2019.11.009>
- Perfetti, J. J.; Balcázar, Á.; Hernández, A. y Leibovich, J. (2013). Políticas para el desarrollo de la agricultura en Colombia. SAC; Fedesarrollo. <http://hdl.handle.net/11445/61>
- Phillips, P. C. B. y Perron, P. (1988). Testing for a unit root in time series regression. *Biometrika*, 75(2), 335-346. <https://doi.org/10.1093/BIOMET/75.2.335>
- Reimers, H. E. (1992). Comparisons of tests for multivariate cointegration. *Statistical Papers*, 33, 335-359. <https://doi.org/10.1007/BF02925336>
- Sujath, R.; Chatterjee, J. M. y Hassanien, A. E. (2020). A machine learning forecasting model for Covid-19 pandemic in India. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, 959-972. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01827-8>
- Sumertajaya, I. M.; Rohaeti, E.; Fitrianto, A. y Adi, W. P. P. (2024). Development of food commodity price forecasting model as an early warning system with a multivariate time series clustering. *Sains Malaysiana*, 53(11), 3779-3789. <https://doi.org/10.17576/jsm-2024-5311-20>
- Uribe, J. F.; Fajardo, E. O. y Romero, H. L. (2017). Incidencia de las políticas públicas de empleo sobre la desocupación en Colombia: un análisis de intervención para el periodo 2002-2014. *Revista Espacios*, 38(36), 22.
- White, J.; Berg, A. A.; Champagne, C.; Zhang, Y.; Chipanshi, A. y Daneshfar, B. (2020). Improving crop yield forecasts with satellite-based soil moisture estimates: An example for township level canola yield forecasts over the Canadian Prairies. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 89. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102092>

Temporal variation of soil acidity attributes in cocoa-growing areas

Variación temporal de los atributos de acidez del suelo en zonas cacaoteras

Ádson dos Santos Oliveira ^{1,4}, José Olímpio de Souza Júnior ^{1,5}, Júlio César Lima Neves ^{2,6}, José Augusto dos Santos Neto ^{3,7}, Dário Ahnert ^{1,8}.

¹Universidade Estadual de Santa Cruz. Campus Soane Nazaré de Andrade. Bahia, Brazil. ²Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Viçosa, Minas Gerais, Brazil. ³Centro Universitário Professor Darcy Ribeiro. Montes Claros, Minas Gerais, Brazil. ⁴✉ asoliveira1@uesc.br; ⁵✉ olimpio@uesc.br; ⁶✉ julio_n2003@yahoo.com.br; ⁷✉ jose.neto@unimontes.br; ⁸✉ darioahnert1@yahoo.com.br



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.114540>

2024 | 73-1 p 92-98 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-05-21 Acep.: 2025-03-13

Abstract

Soil acidity is one of the main constraints to agricultural production in tropical regions. The objective of this study was to assess the variability of chemical attributes related to soil acidity in two layers (0–20 cm and 20–40 cm) across nineteen experimental areas where cocoa was cultivated following surface liming and gypsum application. After 87 months, no association was observed between soil acidification and soil buffering capacity indicators. Surface liming did not affect the acidity attributes within the 0–20 cm layer, suggesting that its impact was limited to upper soil layers. In contrast, gypsum amendment reduced Al^{3+} saturation in the 20–40 cm layer.

Keywords: aluminum, aluminum toxicity, gypsum amendment, gypsum mobility, surface liming.

Resumen

La acidez del suelo es la principal limitación para la producción agrícola en las regiones tropicales. El objetivo de este estudio fue evaluar la variabilidad de los atributos químicos relacionados con la acidez del suelo en dos capas (0–20 cm y 20–40 cm), en diecinueve áreas experimentales donde se cultivó cacao después de la aplicación de encalado superficial y yeso. Después de 87 meses, no se observó ninguna asociación entre la acidificación y los indicadores de amortiguación del suelo. El encalado superficial no afectó los atributos de acidez dentro de la capa de 0–20 cm, lo que indica que su impacto se limitó a las capas superiores del suelo. Por su parte, la enmienda con yeso resultó en una reducción en la saturación de Al^{3+} dentro de la capa de 20–40 cm.

Palabras clave: aluminio, encalado superficial, enmienda de yeso, movilidad del yeso, toxicidad del aluminio.

Introduction

Soil acidity is one of the main constraints to global agricultural production (Gurmessa, 2021; Rheinheimer *et al.*, 2018). About 40 % of the world's arable land is affected by high acidity, particularly in Africa, Asia, and South America (Sumner and Noble, 2003). Acidic soils are characterized by low nutrient availability and cation exchange capacity dominated by H^+ and Al^{3+} (Shetty and Prakash, 2020), which toxicity impairs root development reducing nutrient uptake, crop growth, and yield (Borges *et al.*, 2020).

The cocoa tree is tolerant to Al^{3+} , however, this element reduces the root and shoot dry weight of cocoa seedlings (Baligar and Fageria, 2005). Liming enhances biomass production in cocoa seedlings and boosts cocoa bean yield. It also increases soil pH, as well as Ca^{2+} and Mg^{2+} levels, and lowers Al^{3+} saturation (Hirzel *et al.*, 2020; Souza Júnior *et al.*, 2018). However, this input has low mobility in the soil. Therefore, its corrective effect is restricted to topsoil layers (Li *et al.*, 2019; Rheinheimer *et al.*, 2018).

Agricultural gypsum is a good alternative to reduce subsoil acidity, especially aluminum saturation (m%). Its mobility in the soil profile reduces Al^{3+} toxicity and increases Ca^{2+} and SO_4^{2-} concentrations in deeper soil layers (Enesi *et al.*, 2023). Consequently, water and nutrient absorption in deep layers increases (Bossolani *et al.*, 2020). However, the specific effects of gypsum amendment on cocoa trees are still not fully understood, highlighting the need for further research. Nevertheless, in their pioneering study, Nakayama (1986) showed that gypsum amendment improved the development and distribution of the root system of cocoa seedlings.

This study aimed to assess changes in chemical attributes of soil acidity resulting from lime and gypsum surface application in no-till systems cultivated with cocoa tress in the southeastern region of the state of Bahia, Brazil.

Materials and methods

Data collection

Soil samples were collected from nineteen experimental areas (EAs) located in fifteen municipalities across two climate zones: humid and humid-to-subhumid (SEI-BA, 2022), in the southeastern region of Bahia, Brazil (Figure 1). In total, 20 simple samples were collected for each composite sample. The analysis of the 0–20 cm and 20–40 cm layers were used to calculate the doses of lime and gypsum, respectively (Table 1). The study period was 87 months. Time zero (T0) refers to the month of liming and gypsum amendment, followed by subsequent sampling at T40, T52, T72, and T87 months after fertilization. Samples were collected

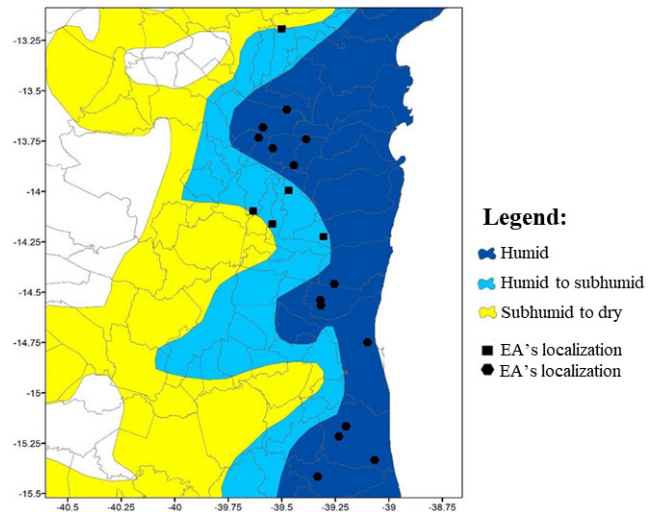


Figure 1. Location and climate type (according to Thornthwaite and Matter) of the nineteen experimental areas under study (SEI-BA, 2022).

in 0–10 cm, 10–20 cm, and 20–40 cm layers at these four times, and the values for the 0–20 cm layer were calculated by averaging the values of the 0–10 cm and 10–20 cm layers. Two composite samples were collected per EA at T40, while six composite samples were collected per EA at T52, T72, and T87.

Soil attributes

The following soil attributes were analyzed: pH in H_2O ; Al^{3+} , Ca^{2+} , and Mg^{2+} extracted with 1.0 mol L^{-1} KCl; potential acidity ($H+Al$) extracted with 0.5 mol L^{-1} $Ca(CH_3COO)_2$; organic matter (OM) determined using the Walkley-Black method; and remaining P (P-rem), assessed by stirring 60 mg L^{-1} P in a 0.01 mol L^{-1} $CaCl_2$ solution (Teixeira *et al.*, 2017). The sand, silt, and clay contents were determined according to Teixeira *et al.* (2017). The aluminum saturation was calculated as follows (Eq. 1):

$$m\% = \frac{Al^{3+}}{Al^{3+} + (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+)} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

The results of the preliminary chemical analysis and the respective lime and gypsum doses are outlined in Table 1.

Calculation of lime and gypsum doses

Lime doses were calculated using the base saturation method (Eq. 2). The objective was to increase base saturation (V%) to 75 % in EAs with initial V% values below 65 % in the 0–20 cm layer, considering a reaction depth (d) of 5 cm and 90 % relative Total Neutralizing Power (RTNP) of the soil corrective. For this purpose, the amount was calculated as follows:

$$LD = \frac{(V_2 - V_1) \times T}{10 \times PRNT} \times \frac{d}{20} \quad (\text{Eq. 2})$$

Where:

LD = lime dose, in tons per hectare (t ha^{-1});

V_2 = target base saturation (75 %);

V_1 = base saturation of the 0–20 cm layer, in %;

T = CEC at pH 7.0, in $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

RTNP = relative total neutralizing power (90 %);

d = lime reaction depth (5 cm).

Gypsum doses were calculated according to the stoichiometric equation proposed by Souza Júnior *et al.* (2018) (Equation 3). The objective was to reduce Al^{3+} saturation (m%) to 20 % in EAs with m% higher than 20 %, considering a layer thickness (LT) of 30 cm and a gypsum percentage ($\% \text{Ca}_{\text{gyp}}$) of 16 %. For this purpose, the amount was calculated as follows:

$$\text{GD} = \left[\text{Al}^{3+} - \left(\frac{m_t \times t}{100} \right) \right] \times \frac{0.2 \times \text{LT}}{\% \text{Ca}_{\text{gyp}}} \quad (\text{Eq. 3})$$

where:

GD = gypsum dose, in tons per hectare (t ha^{-1});

Al^{3+} = Al^{3+} concentration in the 20–40 cm layer, in $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

m_t = tolerable Al^{3+} saturation (cocoa tree = 20 %);

t = effective CEC in the 20–40 cm layer, in $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$;

LT = layer thickness (30 cm);

$\% \text{Ca}_{\text{gyp}}$ = percentage of Ca in gypsum (16 %).

Lime and gypsum amendment method

The lime and gypsum doses (Table 1) were converted to grams per plant and manually broadcast, covering the entire soil surface in a no-till system. To enhance contact between the inputs and the soil, the organic mulch was turned over using a leaf blower.

Statistical analysis

To assess the homogeneity of error variances, a one-way ANOVA was performed for each chemical attribute within each EA, subsequently calculating the ratio of the largest to the smallest mean square residual. The values were well above 7, indicating a lack of homogeneity of variances. Therefore, each EA was considered as an individual experiment. Finally, a regression analysis was performed to evaluate the variation of chemical attributes over time (0, 40, 52, 72, and 87 months), testing linear and quadratic coefficients using the mean square error from the ANOVA of each EA. Significance was assessed at up to 10 % probability, according to the F-test. All statistical tests were performed using the R software (R Core Team, 2023).

Results

The pH values of the 0–20 cm layer remained stable over time in eleven of the EAs (Table 2), seven of which had received surface liming at doses ranging from 0.36 to 1.09 t ha^{-1} (Table 1). The pH of the 0–20 cm layer decreased over time in eight EAs, seven of which had received surface liming at doses ranging from 0.54 to 1.04 t ha^{-1} . In contrast, the pH of the 20–40 cm layer remained stable in twelve EAs, while it decreased in seven EAs over time (Table 2).

Al^{3+} concentration in the 0–20 cm layer did not decrease in any of the fourteen EAs that received surface liming; however, Al^{3+} concentration increased over time in ten EAs (Table 3), nine of which had received liming ranging from 0.54 to 1.09 t ha^{-1} (Table 1). The nine EAs where Al^{3+} concentration did not change were the same ones where the pH did not change either.

Al^{3+} concentrations in the 20–40 cm layer varied in three of the eight EAs that received gypsum amendment (Table 3). The quadratic models were significant, indicating a decrease in Al^{3+} concentrations, which reached minimum values and subsequently increased over time. In these EAs, the effect of gypsum on reducing Al^{3+} concentrations peaked at 38, 52, and 25 months in EAs 3, 4, and 7, respectively. Al^{3+} concentration increased linearly over time in the 20–40 cm layer in five EAs (Table 3); however, gypsum was applied in only one of them, i.e., EA 12, which received a dose of 2.39 t ha^{-1} gypsum (Table 1). Al^{3+} concentrations did not change in eleven EAs, four of which had received gypsum amendment at doses ranging from 0.60 to 1.06 t ha^{-1} .

m% in the 0–20 cm layer did not vary over time in eleven EAs, seven of which received doses of lime ranging from 0.36 to 1.04 t ha^{-1} (Tables 1 and 4). Al^{3+} concentrations did not change either in nine of the eleven EAs mentioned above (Tables 4 and 5). m% increased over time in eight EAs, all of which had received surface liming at doses ranging from 0.54 to 1.09 t ha^{-1} , except for EA 6.

Aluminum saturation in the 20–40 cm layer varied over time in ten EAs (Table 5), increasing in five of them. In these EAs, gypsum was not applied. m% variation over time was described using a quadratic equation in the five EAs. All of them received gypsum amendments (Table 5 and Figure 2). The mean minimum m% ($\text{m\%}_{\text{min}}$) was 15.6 %, reached, on average, 41 months after applying gypsum.

Discussion

The pH in the 0–20 cm layer did not increase in the EAs that received surface liming (Table 2). This result suggests that the corrective effect was restricted to the topsoil layers, which were not assessed in this study. Furthermore, this result corroborates the

Table 1. Initial pH and chemical attribute* values used to calculate the lime and gypsum amendments for two soil layers and the respective lime and gypsum doses applied across nineteen experimental areas under cocoa cultivation, in the state of Bahia, Brazil

EA	Climate zone	0-20 cm layer			20-40 cm layer			Input	
		pH	T	V	pH	Al ³⁺	t	Lime	Gypsum
			mmol _c dm ⁻³	%		mmol _c dm ⁻³		t ha ⁻¹	
1	humid	5.56	101.7	44.9	4.59	6.8	16.6	0.80	1.31
2	humid	6.51	104.1	87.5	6.50	0.0	78.5	---	---
3	humid	5.61	91.8	47.7	4.67	10.7	17.6	0.70	2.69
4	humid	5.81	91.0	50.5	4.91	8.8	17.9	0.62	1.96
5	humid	5.88	49.4	73.6	4.78	5.9	19.8	---	0.73
6	humid	6.01	80.2	70.0	5.51	4.9	37.8	---	---
7	humid	5.27	114.2	42.2	4.68	4.9	20.7	1.04	0.29
8	humid	5.84	73.0	52.0	4.90	4.0	12.0	0.46	0.60
9	humid	5.31	79.4	30.0	5.15	3.9	18.4	0.98	---
10	humid	5.83	123.0	59.3	5.14	5.0	28.2	0.54	---
11	humid	6.08	99.8	59.9	5.42	2.0	27.7	0.42	---
12	humid	4.95	90.2	33.4	4.75	10.7	21.7	1.04	2.39
13	humid	5.52	86.3	50.1	5.22	0.0	16.6	0.54	---
14	humid	6.50	60.3	81.7	4.76	0.0	19.4	---	---
15	hs ¹	5.69	102.3	56.0	4.99	4.9	26.8	0.54	---
16	hs	7.34	73.1	86.3	6.63	0.0	37.5	---	---
17	hs	5.35	115.4	41.0	4.17	6.8	19.9	1.09	1.06
18	hs	5.63	92.3	61.0	5.11	4.0	24.3	0.36	---
19	hs	5.55	110.8	49.4	4.90	1.0	24.7	0.78	---

* pH in H₂O; T: cation-exchangeable capacity (CEC) at pH 7.0; V: base saturation; Al³⁺: exchangeable aluminum; t: effective CEC. ¹ Humid to subhumid.

Table 2. Regression equations of pH variation over time* in two soil layers across nineteen experimental areas under cocoa cultivation in the state of Bahia, Brazil

AE	Layer			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equation	R ²	Equation	R ²
1	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.38$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.83$	-
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6.11$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.92$	-
3	$\hat{Y} = 5.69 - 0.013^{**}t$	0.80	$\hat{Y} = 4.70 - 0.004^{*}t$	0.46
4	$\hat{Y} = 5.76 - 0.009^{**}t$	0.83	$\hat{Y} = 4.98 - 0.005^{*}t$	0.69
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.54$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.01$	-
6	$\hat{Y} = 6.05 - 0.013^{**}t$	0.74	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.16$	-
7	$\hat{Y} = 5.45 - 0.013^{**}t$	0.74	$\hat{Y} = 4.78 - 0.007^{**}t$	0.80
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.44$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.72$	-
9	$\hat{Y} = 5.38 - 0.008^{**}t$	0.97	$\hat{Y} = 5.03 - 0.006^{**}t$	0.93
10	$\hat{Y} = 5.22 - 0.008^{*}t$	0.48	$\hat{Y} = 4.69 - 0.004^{*}t$	0.42
11	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.35$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.86$	-
12	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.89$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.40$	-
13	$\hat{Y} = 5.56 - 0.007^{**}t$	0.99	$\hat{Y} = 5.18 - 0.006^{**}t$	0.92
14	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6.23$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.72$	-
15	$\hat{Y} = 5.77 - 0.010^{**}t$	0.62	$\hat{Y} = 5.05 - 0.008^{**}t$	0.79
16	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6.09$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.46$	-
17	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.91$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.34$	-
18	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.16$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.75$	-
19	$\hat{Y} = \bar{Y} = 5.33$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.75$	-

* Time in months.

‘**’, ‘*’ and ‘o’ are significant at 0.01, 0.05, and 0.1, respectively, according to the F-test.

Table 3. Regression equations of the variation of Al³⁺ concentration over time* in two soil layers of nineteen experimental areas under cocoa cultivation in the state of Bahia, Brazil

AE	Layer			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equation	R ²	Equation	R ²
1	$\hat{Y} = -0.6 + 0.030^{*}t$	0.82	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6.1$	-
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.0$	-
3	$\hat{Y} = -0.2 + 0.076^{**}t$	0.57	$\hat{Y} = 10.4 - 0.176t^{**} + 0.002^{**}t^2$	0.94
4	$\hat{Y} = -0.4 + 0.019^{**}t$	0.81	$\hat{Y} = 8.6 - 0.256^{**}t + 0.003^{**}t^2$	0.99
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.2$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2.0$	-
6	$\hat{Y} = -0.8 + 0.049^{*}t$	0.51	$\hat{Y} = \bar{Y} = 6.7$	-
7	$\hat{Y} = -3.9 + 0.141^{**}t$	0.65	$\hat{Y} = 5.0 - 0.124^{*}t + 0.003^{**}t^2$	0.67
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.5$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 4.2$	-
9	$\hat{Y} = 1.8 + 0.040^{*}t$	0.57	$\hat{Y} = \bar{Y} = 7.7$	-
10	$\hat{Y} = -0.2 + 0.075^{*}t$	0.36	$\hat{Y} = 5.7 + 0.098^{**}t$	0.66
11	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.5$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 3.8$	-
12	$\hat{Y} = \bar{Y} = 3.7$	-	$\hat{Y} = 9.0 + 0.057^{*}t$	0.72
13	$\hat{Y} = -0.3 + 0.021^{*}t$	0.68	$\hat{Y} = 0.04 + 0.038^{*}t$	0.67
14	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.1$	-
15	$\hat{Y} = -1.4 + 0.054^{**}t$	0.70	$\hat{Y} = -0.2 + 0.112^{**}t$	0.46
16	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.03$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.8$	-
17	$\hat{Y} = 0.2 + 0.029^{*}t$	0.56	$\hat{Y} = \bar{Y} = 7.1$	-
18	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.9$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 3.6$	-
19	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.7$	-	$\hat{Y} = 1.0 + 0.048^{*}t$	0.99

* Al³⁺ concentration in mmol_c dm⁻³; time in months.

‘**’, ‘*’ and ‘o’ are significant at 0.01, 0.05, and 0.1, respectively, according to the F-test.

Table 4. Regression equations of Al^{3+} saturation over time* in two soil layers of nineteen experimental areas under cocoa cultivation in the state of Bahia, Brazil

EA	Layer			
	0-20 cm		20-40 cm	
	Equation	R ²	Equation	R ²
1	$\hat{Y} = -2.2 + 0.088^\circ t$	0.81	$\hat{Y} = 41.0 - 1.102t + 0.013^{**}t^2$	0.98
2	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.0$	-
3	$\hat{Y} = -3.5 + 0.229^{**}t$	0.54	$\hat{Y} = 62.1 - 1.667^{**}t + 0.019^{**}t^2$	0.98
4	$\hat{Y} = -1.1 + 0.042^{**}t$	0.77	$\hat{Y} = 49.0 - 1.635^{**}t + 0.016^{**}t^2$	0.99
5	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.6$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 9.5$	-
6	$\hat{Y} = -2.4 + 0.119^\circ t$	0.52	$\hat{Y} = \bar{Y} = 14.7$	-
7	$\hat{Y} = -15.6 + 0.470^{**}t$	0.61	$\hat{Y} = 23.9 - 1.001^{**}t + 0.018^{**}t^2$	1.00
8	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1.4$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 25.3$	-
9	$\hat{Y} = \bar{Y} = 14.9$	-	$\hat{Y} = 25.4 + 0.289^\circ t$	0.73
10	$\hat{Y} = -2.0 + 0.195^\circ t$	0.35	$\hat{Y} = 11.2 + 0.480^{**}t$	0.58
11	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.8$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 13.9$	-
12	$\hat{Y} = \bar{Y} = 8.3$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 50.0$	-
13	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2.7$	-	$\hat{Y} = 0.3 + 0.232^\circ t$	0.55
14	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.0$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.4$	-
15	$\hat{Y} = -3.5 + 0.126^{**}t$	0.64	$\hat{Y} = -11.4 + 0.666^{**}t$	0.49
16	$\hat{Y} = \bar{Y} = 0.1$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 2.4$	-
17	$\hat{Y} = -0.7 + 0.071^\circ t$	0.62	$\hat{Y} = 38.4 - 1.042t^* + 0.013^\circ t^2$	0.55
18	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1.6$	-	$\hat{Y} = \bar{Y} = 11.2$	-
19	$\hat{Y} = \bar{Y} = 1.8$	-	$\hat{Y} = -0.4 + 0.375^{**}t$	0.96

* Al^{3+} saturation in percentage; time in months.

***, **, and ° are significant at 0.01, 0.05, and 0.1, respectively, according to the F-test.

findings of other studies, which have shown that the corrective effects of surface liming in a no-till system are limited to the topsoil layers, particularly at depths of 0-5 cm and 5-10 cm (Alleoni *et al.*, 2005; Zandoná *et al.*, 2015). In a field study with cocoa trees, Nakayama (1986) observed that surface liming in a no-till system corrected soil acidity up to a depth of 10 cm, six years after the application of this amendment. The effect of surface liming is restricted

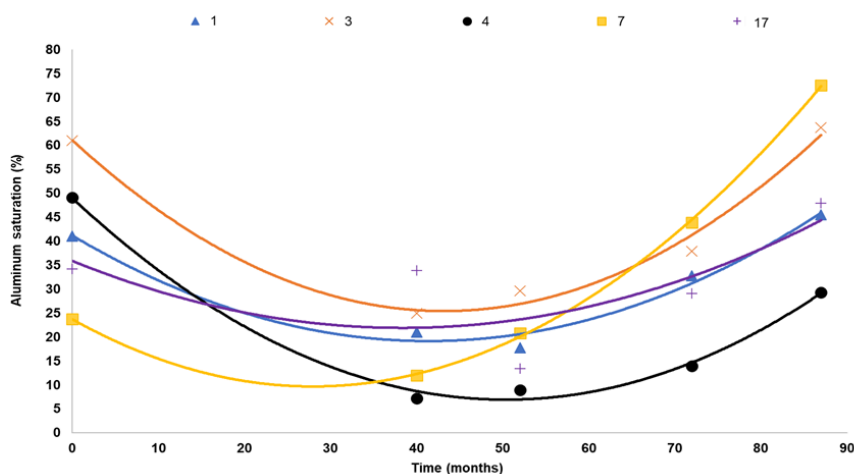
Table 5. Estimates of the minimum Al^{3+} saturation and the times to reach 20 % Al^{3+} saturation, minimum m%, and 20 % Al^{3+} saturation again, in five experimental areas under cocoa cultivation in the state of Bahia, Brazil

EA	m% _{min}	-----Time (months)-----		
		T1	T2	T3
1	17.6	29	42	56
3	25.5	nd ^{1/}	44	nd ¹
4	7.2	23	51	80
7	10.0	04	28	52
17	17.5	26	40	54
Mean	15.6	20.5	41.0	60.5

to the topsoil layers because lime has low mobility in the soil due to the loss of the accompanying ion (CO_3^{2-}) during dissolution reactions, which consume H^+ , yielding H_2CO_3 . Subsequently, H_2CO_3 dissociates into H_2O and CO_2 . In addition, the Al^{3+} precipitation reaction with OH^- derived from lime dissolution forms $\text{Al}(\text{OH})_3$, contributing to the surface effect of this input (Rheinheimer *et al.*, 2018).

The coefficients of the linear regression models for the 0-20 cm layer ranged from 0.007 to 0.013 per month, corresponding to an annual pH reduction rate ranged from 0.084 to 0.156 units (Table 2). In the 20-40 cm layer, the annual pH reduction rate ranged from 0.048 to 0.096. These results suggest that the acidification process is more intense in the topsoil layer.

The soil buffering indicators T, P-rem, OM, and clay did not explain differences in pH variation between soils because their mean values were 96.6 mmol dm^{-3} , 37.6 mg L^{-1} , 30.1 g kg^{-1} , and 42.1 %, respectively, in the eleven EAs where the pH of the 0-20 cm layer did not change over time. These results indicate a lower acidity buffering in these soils than in the soils of the eight EAs whose pH values decreased over time, with average values of 102.0 mmol dm^{-3} , 31.5 mg L^{-1} , 34.8 g kg^{-1} , and 47.9 %, respectively.

**Figure 2.** Variation of Al^{3+} saturation over time in five EAs under cocoa cultivation in the state of Bahia, Brazil

Climate may be useful to explain these results because seven of the eight EAs whose pH values decreased over time are located in the rainiest climate zone (Tables 1 and Figure 1). High precipitation rates promote the leaching of basic cations, thereby increasing soil acidity. In addition to climate, the decrease in pH values over time in the seven EAs that received surface liming might have been caused by interactions between factors such as the low dose of lime applied to the soil, averaging 0.71 t ha^{-1} , and OM mineralization.

Neither the Al^{3+} concentration (Table 3) nor the pH (Table 2) changed over time in the 0–20 cm layer in nine EAs, suggesting a close correlation between these two attributes. Al^{3+} solubility and, hence, toxicity, are primarily controlled by the pH. Al^{3+} availability troughs at pH levels above 5.5 (Ruiz *et al.*, 2016). Therefore, despite having received surface liming, some EAs did not show variations in Al^{3+} because the pH did not change.

The m% in the 0–20 cm layer did not change in eleven of the EAs. In ten of them, the mean m% ranged from 0 % to 8.3 % (Table 4). These m% values were low for cocoa trees, according to Souza Júnior *et al.* (2018). The mean m% was higher (14.9 %) only in EA 9; however, it was still lower than the threshold of 15 % suggested by Baligar and Fageria (2005) as the maximum m% tolerated by the crop. Nevertheless, m% increased over time in this layer in eight EAs (Table 4), reflecting a rise in Al^{3+} concentrations despite surface liming being applied in seven of them at doses ranging from 0.54 to 1.09 t ha^{-1} (Table 1). In this context, the increase in Al^{3+} and, thus, in m%, might have resulted from natural soil acidification processes such as OM mineralization, root uptake of basic cations and H^+ extrusion, leaching of bases, and H^+ and Al^{3+} accumulation in the soil profile (Li *et al.*, 2019). The low mean dose of 0.71 t ha^{-1} lime combined with the low mobility of this input might have also contributed to this result (Alleoni *et al.*, 2005; Parecido *et al.*, 2021; Zandoná *et al.*, 2015). The coefficients of the linear regression models indicated an increase in m%, ranging from 0.5 % to 5.6 % per year.

The m% in the 20–40 cm layer decreased in five EAs after surface gypsum amendment (Table 5). The minimum m% ($m\%_{\min}$) reached in each EA was estimated based on quadratic models of the variation of m% over time and gypsum dose. The $m\%_{\min}$ values ranged from 7.2 % to 25.5 %, averaging $15.6\%_{\min}$. This value is close to the target m% of 20 % which was adopted as the tolerable threshold (m_t) for cocoa cultivation and used to calculate the doses of gypsum (Equation 3).

The following time estimates were also calculated: T1, the time required to reach the target m% tolerated by the crop (m_t), set at 20 % (Equation 3); T2, the time to reach the minimum $m\%_{\min}$, representing

the maximum duration of gypsum effectiveness; and T3, the time until m% rises back to 20 %, indicating the need for gypsum reapplication. The mean T1, T2, and T3 values were 20.5, 41, and 60.5 months, respectively (Table 5). The maximum gypsum effectiveness on m% reduction (T2) ranged from 28 to 51 months after application. This range is higher than the maximum time of 22 months assessed by Nora and Amado (2013) and similar to the maximum time (43 months) assessed by Caires *et al.* (2000). Moreover, both studies reported that gypsum chemically improves subsurface soil layers by reducing Al^{3+} concentrations and m%. However, the periods assessed in both studies were shorter than those of this study, where the time for gypsum reapplication (T3) ranged from 52 to 80 months (Table 5). This time interval exceeded the residual effect of the gypsum amendment of 60 months reported by da Costa *et al.* (2016), and the maximum duration of 72 months observed by Pauletti *et al.* (2014).

The m% in the 20–40 cm layer increased over time in five of the EAs that were not treated with gypsum (Tables 1 and 5). Based on the linear regression models, m% increased at an annual rate ranging from 2.8 % to 8.0 %.

Conclusions

Soil acidification in experimental areas (EAs) under cocoa cultivation varied markedly over a period of 87 months, showing no correlation with soil buffering indicators.

Surface liming in a no-till system did not change the chemical attributes in the 0–20 cm layer; therefore, its effect might have been restricted to the topsoil layers.

Surface gypsum amendment in a no-till system led to a reduction in Al^{3+} concentration and, especially, Al^{3+} saturation in the 20–40 cm layer in some EAs; however, this effect diminished over time.

References

- Alleoni, L. R. F.; Cambri, M. A. and Caires, E. F. (2005). Chemical attributes of a cerrado Oxisol under no-tillage as affected by lime application methods and doses. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29(6), 923-934. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600010>
- Baligar, V. C. and Fageria, N. K. (2005). Soil aluminum effects on growth and nutrition of cacao. *Soil Science and Plant Nutrition*, 51(5), 709-713. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2005.tb00097.x>
- Borges, C. E.; Cazetta, J. O.; Sousa, F. B. F. and Oliveira, K. S. (2020). Aluminum toxicity reduces the nutritional efficiency of macronutrients and micronutrients in sugarcane seedlings. *Ciência e Agrotecnologia*, 44, e015120. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202044015120>

- Bossolani, J. W.; Crusciol, C. A. C.; Merloti, L. F.; Moretti, L. G.; Costa, N. R.; Tsai, S. M. and Kuramae, E. E. (2020). Long-term lime and gypsum amendment increase nitrogen fixation and decrease nitrification and denitrification gene abundances in the rhizosphere and soil in a tropical no-till intercropping system. *Geoderma*, 375, 114476. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114476>
- Caires, E. F.; Banzatto, D. A. and Fonseca, A. F. (2000). Surface application of lime under a no-tillage system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24(1), 161-169. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832000000100018>
- Da Costa, C. H. M.; Crusciol, C. A. C.; Neto, J. F. and Castro, G. S. A. (2016). Residual effects of superficial liming on tropical soil under no-tillage system. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 1633-1642. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900063>
- Enesi, R. O.; Dyck, M.; Chang, S.; Thilakarathna, M. S.; Fan, X.; Strelkov, S. and Gorim, L. Y. (2023). Liming remediates soil acidity and improves crop yield and profitability-a meta-analysis. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1194896. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1194896>
- Gurmessa, B. (2021). Soil acidity challenges and the significance of liming and organic amendments in tropical agricultural lands with reference to Ethiopia. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 77-99. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00615-2>
- Hirzel, J.; Undurraga, P.; León, L.; Panichini, M.; Carrasco, J.; González, J. and Matus, I. (2020). Maize grain production, plant nutrient concentration and soil chemical properties in response to different residue levels from two previous crops. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil and Plant Science*, 70(4), 285-293. <https://doi.org/10.1080/09064710.2020.1725619>
- Li, G. D.; Conyers, M. K.; Helyar, K. R.; Lisle, C. J.; Poile, G. J. and Cullis, B. R. (2019). Long-term surface application of lime ameliorates subsurface soil acidity in the mixed farming zone of south-eastern Australia. *Geoderma*, 338, 236-246. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.003>
- Nakayama, L. H. I. (1988). Influência das formas de aplicação de calcário e gesso agrícola sobre o desenvolvimento do cacauzeiro. *Revista Theobroma*, 18(4), 241-246. <https://repositorio-dspace.agricultura.gov.br/handle/1/1207>
- Nora, D. D. and Amado, T. J. C. (2013). Improvement in chemical attributes of oxisol subsoil and crop yields under no-till. *Agronomy Journal*, 105(5), 1393-1403. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0031>
- Parecido, R. J.; Soratto, R. P.; Perdoná, M. J.; Guidorizzi, F. V. C.; Gomes, G. G.; Paula, R. A. and Gitari, H. I. (2021). Limestone increased coffee yield and profitability more than phosphogypsum or their combination. *Agronomy Journal*, 113(4), 3586-3599. <https://doi.org/10.1002/agj2.20712>
- Pauletti, V.; de Pierri, L.; Ranzan, T.; Barth, G. and Motta, A. C. V. (2014). Long-term effects of the application of gypsum and lime in a no-till system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(2), 495-505. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200014>
- R Core Team (2023). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>
- Rheinheimer, D. S.; Tiecher, T.; Gonzatto, R.; Zafar, M. and Brunetto, G. (2018). Residual effect of surface-applied lime on soil acidity properties in a long-term experiment under no-till in a Southern Brazilian sandy Ultisol. *Geoderma*, 313, 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.024>
- Ruiz, J. C.; Cerna-Rebaza, L.; Hernández-Villalobos, K.; Silva-Pereda, L. and Vásquez-Cunya, F. (2016). Effect of aluminum and pH on the growth of roots of *Phaseolus vulgaris* var. caballero under laboratory conditions. *REBIOL*, 36(2), 4-15. <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/facccbiol/article/view/1696>
- SEI-BA. (2022). Tipologia climática Thornthwaite & Matter. Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia (SEI-BA). https://ftp.sei.ba.gov.br/Geoinformacao/mapas/estado/mapa_tipclim-tm_ba_2m_1998_cor.pdf
- Shetty, R. and Prakash, N. B. (2020). Effect of different biochars on acid soil and growth parameters of rice plants under aluminum toxicity. *Scientific Reports*, 10, 12249. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-69262-x>
- Souza Júnior, J. O.; Sodré, G. A. and Neves, J. C. L. (2018). Fertilidade do solo, correção da acidez e recomendação de adubação para o cacauzeiro. In Souza Júnior, J. O. (ed.). *Cacau: cultivo, pesquisa e inovação* (pp. 333-377). Editus. <https://doi.org/10.7476/9786586213188>
- Sumner, M. E. and Noble, A. D. (2003). Soil acidification: The world story. In Rengel, Z. (ed.). *Handbook of Soil Acidity* (p. 27). CRC Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9780203912317-3/soil-acidification-world-story-malcolm-sumner-andrew-noble>
- Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A. and Teixeira, W. G. (2017). *Manual de métodos de análise de solo* (p. 574). Brasília: EMBRAPA. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/181717/1/Manual-de-Metodos-de-Analise-de-Solo-2017.pdf>
- Zandoná, R. R.; Beutler, A. N.; Burg, G. M.; Barreto, C. F. and Schmidt, M. R. (2015). Gypsum and lime increase soybean and maize yield and decrease drought stress. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 45(2), 128-137. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4530301>

Determinación de las necesidades hídricas de *Carica papaya* L. en los híbridos Paulina y Tainung mediante teledetección

Determination of the water requirements of *Carica papaya* L. in the Paulina and Tainung hybrids using remote sensing

Maria Mercedes Bermeo Vargas ^{1,2}, Enrique Alejandro Torres Prieto ^{1,3}, Yuri Peralta ^{1,4}.

¹Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira. Palmira, Colombia. ²✉ mbermeov@unal.edu.co; ³✉ etorresp@unal.edu.co;

⁴✉ yurip20@hotmail.com



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.117549>

2024 | 73-1 p 99-106 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-11-13 Acep.: 2025-03-16

Resumen

La papaya (*Carica papaya* L.), originaria de Centroamérica, es uno de los principales cultivos frutales en zonas tropicales y subtropicales. Estimar el agua necesaria para el cultivo de *C. papaya* en las diferentes etapas de crecimiento es crucial para mejorar el rendimiento del cultivo. La evapotranspiración (ET) es un componente clave para la estimación del requerimiento hídrico del cultivo. El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) puede utilizarse para estimar el coeficiente de cultivo basal (Kcb) y así determinar la ET del cultivo. Este estudio evaluó dos métodos para determinar el Kcb y el requerimiento hídrico de *C. papaya* en los híbridos Paulina y Tainung utilizando imágenes RGB y multiespectrales. Este estudio determinó los valores de Kcb y la duración de cada etapa fenológica de *C. papaya*. Con estos datos se implementó el modelo FAO-56, el cual muestra un requerimiento anual de 1278 mm de agua para el cultivo de *C. papaya* (en las condiciones del área de estudio). En relación con la producción, se requieren 0.14 m³ de agua para producir 1 kg de papaya.

Palabras claves: evapotranspiración, FAO-56, fracción de cobertura, NDVI.

Abstract

Papaya (*Carica papaya* L.), native to Central America, is one of the main fruit crops in tropical and subtropical regions. Accurately estimating the water requirements of *C. papaya* at different growth stages is essential for optimizing crop yields. Moreover, evapotranspiration (ET) is a key factor in determining crop water demand. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) can be used to estimate the basal crop coefficient (Kcb), which in turn allows for the calculation of crop ET. This study evaluated two methods for determining Kcb and water requirements of *C. papaya* in the hybrid cultivars Paulina and Tainung using RGB and multispectral imagery. The study determined Kcb values and the duration of each phenological stage of *C. papaya*. These data were used to implement the FAO-56 model, which estimated an annual water requirement of 1278 mm for *C. papaya* under the conditions of the study area. Regarding fruit production, it was determined that 0.14 m³ of water is required to produce 1 kg of papaya.

Keywords: Cover fraction, evapotranspiration, FAO-56, NDVI.

Introducción

Carica papaya L. es una planta de crecimiento rápido, originaria de Centroamérica, que se considera semileñosa. Tiene tallo cilíndrico, hueco y de color verde, con un diámetro en la base hasta de 40 cm, más delgado en la parte superior y puede alcanzar hasta 10 m de altura (Campostrini et al., 2018). Es uno de los principales cultivos frutales en zonas tropicales, subtropicales y es consumida en todo el mundo (Ruas et al., 2022).

C. papaya está adaptada a regímenes pluviométricos de la región centroamericana y no tolera déficits hídricos prolongados; los factores ambientales como la temperatura, la velocidad del viento, el estrés hídrico y las características fisicoquímicas del suelo pueden afectar su fisiología y productividad. Por esto, el déficit hídrico limita el crecimiento de las plantas, lo que favorece la producción de flores masculinas y reduce la producción. Por otro lado, el estrés hídrico por exceso también afecta la absorción de nutrientes y su lixiviación, disminuye la disponibilidad de oxígeno en la zona de raíces y aumenta la predisposición a enfermedades y plagas (Ruas et al., 2022).

Estimar el agua disponible en las diferentes etapas de crecimiento del cultivo es un factor crítico para el buen manejo agrícola y esencial para mejorar el uso del agua y el rendimiento del cultivo (Helman et al., 2019). Un componente importante en el cálculo del agua disponible para el cultivo, y en el balance hídrico, es la evapotranspiración real del cultivo (ET_c), que es la pérdida de agua a través de procesos de evaporación directa del suelo y transpiración de las plantas (Helman et al., 2019). La evaporación es la pérdida más pronunciada de humedad del suelo y representa entre el 25 % y 50 % de la evapotranspiración de un cultivo. Esta depende del déficit de vapor del aire, de las propiedades físicas del suelo y del área sin sombra (Coelho et al., 2022).

Varias tecnologías promueven la reducción de la pérdida de humedad del suelo, la cual es generada por la evaporación. Entre ellas está la película de polietileno sobre el suelo, que es una excelente estrategia en el riego por goteo y tiene muchos beneficios y ventajas, como el ahorro de agua de riego y la conservación de humedad del suelo, lo cual mejora la temperatura del suelo y promueve la germinación, las cosechas tempranas y el aumento del rendimiento de los cultivos (Chen et al., 2020). Además, las prácticas de acolchado con plástico de polietileno previenen el crecimiento de arvenses, con lo que se reduce la competencia de nutrientes entre el cultivo y las malezas (Coelho et al., 2022).

Por otro lado, los índices de vegetación (IV) se han utilizado, a menudo, para estimar el coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) de diferentes cultivos. La estimación del K_{cb} por medio de IV se asocia con la estrecha relación que existe entre la cantidad de vegetación y la transpiración, a medida que aumenta

la cobertura vegetal aumenta la transpiración. Además, el seguimiento frecuente de los cultivos mediante IV puede proporcionar información para definir la duración de las etapas de crecimiento de los cultivos y ajustar la fracción de cobertura vegetal (De Freitas et al., 2023; Elshikha et al., 2022; Tang et al., 2019).

Actualmente se ha incrementado el uso de datos de teledetección para evaluar la ET de los cultivos y el estrés hídrico, proporcionando información espacial. Los IV, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), han sido relacionados empíricamente con el K_{cb} (Guerrero y Torres, 2022; Ortiz y Torres, 2018) y aplicados a la evapotranspiración de referencia (ET_o) para estimar el consumo de agua de los cultivos, como es el caso del estudio de Bispo et al. (2022); también se han desarrollado siguiendo la metodología de la FAO56 (Segovia et al., 2019). En el estudio de Zhang et al. (2023) se realizó un estudio sobre la relación del IV con el K_{cb} en el cultivo de maíz. De igual forma, en el cultivo de uva y trigo se ha estimado la evapotranspiración utilizando datos de IV, como lo muestran Vanino et al. (2015).

Por su parte, este estudio estima el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) mediante dos aproximaciones de la teledetección (imágenes RGB y multiespectrales) para la determinación del requerimiento hídrico del cultivo de *C. papaya* híbrido Paulina y Tainung.

Materiales y métodos

El presente estudio se realizó en una parcela ubicada en las afueras de la ciudad de Palmira, Valle del Cauca, Colombia (Figura 1), con coordenadas 3°33'12"N 76°15'27"W y 1057 m s. n. m., perteneciente a la empresa Proterra, entre enero y diciembre del 2023.

El estudio inició con la plantación del cultivo de *C. papaya* en los híbridos Paulina y Tainung. Se realizó el seguimiento al cultivo durante 11 meses, que correspondieron a 332 días después de siembra (DDS). El proyecto duró desde el 26 de enero hasta el 14 de diciembre de 2023. Para la investigación se analizó una parcela de 2.9 ha en total, con 1.4 ha para el híbrido Paulina y 1.5 ha para el híbrido Tainung. La distancia de siembra fue de 1.60 m y la distancia entre surco de 3.5 m, con densidad de siembra de 1.785 árboles ha⁻¹ en ambos híbridos. En el cultivo se usó acolchado de polietileno color plata para reducir pérdidas de humedad por evaporación y control de arvenses.

Para la caracterización del suelo se tomaron muestras en campo y se realizó el estudio de textura por el método de hidrómetro y la densidad aparente por el método de cilindro; además, se determinó la humedad a capacidad de campo y punto de marchitez a partir de la curva de tensión de humedad con el modelo de Van Genuchten (Van Genuchten et al., 1991) y el programa Hydrus-1D.

Localización del sitio de estudio

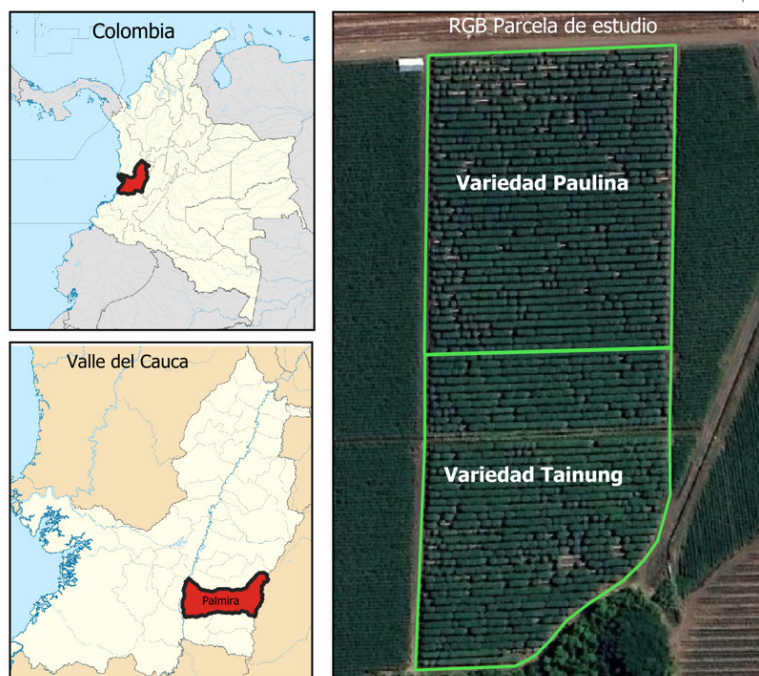


Figura 1. Ubicación de la parcela de estudio híbrido Paulina y Tainung en el Valle del Cauca. Fuente: elaboración propia.

En el cultivo de *C. papaya* se implementó un sistema de riego por cinta de goteo para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo, según el programa de riego de la empresa Proterra. Los goteros se ajustaron con un caudal de 1 l h⁻¹, separación de emisores de 20 cm y 2 hileras de cinta en cada surco. De igual forma, el manejo nutricional por fertirrigación, el control de plagas y enfermedades y las labores culturales, como el deschuponado, se realizaron según los criterios de la empresa.

Para la toma de imágenes se utilizó el vehículo aéreo no tripulado DJI Matriz 200V2 y 2 cámaras entre las 10:00 y 14:00 horas. El tiempo de vuelo fue de 20 a 25 minutos. Con la cámara Zenmuse X5S se capturaron imágenes RGB volando a una altitud de 60 m sobre el nivel de suelo, con resolución espacial de 1.37 cm. Con la cámara multispectral MicaSense Red Edge-Mx (banda Blue, Green, Red, Red Edge, Nir) se capturaron imágenes multispectrales volando a una altura de 50 m sobre el nivel del suelo, con una resolución espacial de 3.47 cm. La trayectoria del vuelo se planificó usando la aplicación DJI Pilot y las imágenes se tomaron con una superposición frontal y lateral del 80 %. En los 11 meses del estudio se realizaron 8 vuelos.

En el procesamiento de las imágenes se utilizó el software Pix4D Mapper (Veramendi y Cruvinel, 2024) para crear mosaicos y ortorectificar las imágenes RGB y multispectrales. Las imágenes multispectrales se calibraron con el panel de calibración de reflectancia MicaSense al inicio y fin de cada vuelo (Cao et al.,

2019). Durante cada visita realizada al cultivo se seleccionaron aleatoriamente 15 árboles de *C. papaya* por cada híbrido y se midieron su altura y diámetro de tallo, para un total de 30 árboles en la parcela de estudio; con esto se obtuvo el promedio y desviación estándar de altura y diámetro de tallo para cada híbrido. Además, se identificó la aparición de flor en la tercera visita a campo a los 77 DDS.

De los ortomosaicos RGB se determinó la fracción de cobertura (Fc); para esto se tomó de referencia la metodología propuesta por Cihlar et al. (1987), que está basada en clasificación supervisada de imágenes de alta resolución en el software Qgis; se utilizó el complemento de clasificación semiautomática con un algoritmo de mapeo de ángulo espectral y se asignaron clases a los diferentes píxeles de suelo, plástico y vegetación. Igualmente, se obtuvieron los porcentajes de fracción de cobertura, como se muestra en la Figura 2. Para observar la variabilidad de la Fc en cada híbrido se dividió cada lote en 4; de estas divisiones se calculó el promedio y la desviación estándar en cada fecha.

De igual forma, a partir de los ráster de los vuelos multispectrales se determinó el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) con la Ecuación 1 (Jiang et al., 2021) el cual es ilustrado en la Figura 2. En cada visita a campo se obtuvieron el promedio y la desviación estándar de NDVI para cada híbrido.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{Ec. 1}$$

Con el promedio de los modelos recopilados de la relación entre Fc y el Kcb en la Tabla 2 del estudio de Guerrero y Torres (2022) se determinó la curva del Kcb del cultivo de *C. papaya* en cada híbrido a partir de la Fc.

Así mismo, con el promedio de los modelos recopilados de la relación entre NDVI y el Kcb en la Tabla 1 del estudio de Ortiz y Torres (2018) se determinó la curva del Kcb del cultivo de *C. papaya* en cada híbrido a partir del NDVI (Tabla1).

Resultados y discusión

Con los datos de las variables meteorológicas de la estación Palmira La Rita se calculó la ETo, siguiendo a Allen et al. (2005). Se observó una ETo promedio de 3.8 mm, un valor mínimo y máximo de 1.4 mm y 5.4 mm. También se registró una precipitación total de 792.8 mm.

Del estudio del suelo se encontró que el perteneciente al lote de híbrido Paulina presentó textura franco-arcillosa, densidad aparente de 1.14 gr cm⁻³, capacidad de campo (CC) de 30.8 % y punto de marchitez permanente (PMP) de 12.5 %. De igual forma, el lote perteneciente al Tainung presentó textura franca, densidad aparente de 1.2 gr cm⁻³, CC de 26.7 % y PMP de 10 %.

Tabla 1. Relaciones matemáticas entre el NDVI y el coeficiente basal del cultivo (Kcb) reportadas en la literatura

Equation K _{cb}	R ²	Crop	Author
1.181 * NDVI 0.026	-	Maize	(Bausch et al., 1987)
1.092 * NDVI 0.053	0.96	Maize	(Neale et al., 1989)
1.49 * NDVI - 0.12	0.92	Cotton	(Hunsaker et al., 2003)
1.50 * NDVI - 0.10	0.94	Maize	(González et al., 2004)
1.56 * NDVI - 0.10	-	Various Crops	(Calera et al., 2005)
1.46 * NDVI - 0.19	0.93	Maize and Wheat	(Gonzales, 2006)
1.64 * NDVI - 0.14	0.79	Wheat	(Duchemin et al., 2006)
1.34 * NDVI - 0.14	0.86	Wheat	(López et al., 2009)
1.44 * NDVI - 0.10	0.96	Grape	(Campos et al., 2010)
1.464 * NDVI - 0.253	0.85	Maize	(Toureiro et al., 2017)

Fuente: tomado de Ortiz y Torres (2018). Dado que es una Tabla citada, en este artículo no se incluyen las referencias de la columna *Author*, estas se pueden consultar en el artículo original.

Tabla 2a. Etapas de desarrollo del cultivo de *C. papaya* y Kcb ajustado

Variedad	Etapas de desarrollo			
	(L _{ini})	(L _{desarrollo})	(L _{med})	(L _{fin})
Paulina/Tainung	31	90	150	62

Tabla 2b. Etapas de desarrollo del cultivo de *C. papaya* y Kcb ajustado

Etapas	Kcb _{ajustado}
(L _{ini})	0.15
(L _{med})	1.00
(L _{fin})	0.80

En la Figura 3a se muestran los resultados de la evolución de altura en los 2 híbridos de *C. papaya*. Estos muestran una altura máxima de 330.8 cm en el híbrido Paulina y 411.5 cm en el híbrido Tainung, para la fecha final del estudio (332 DDS), debido al crecimiento de la planta que es constante a lo largo de su ciclo. Algunas plantas de *C. papaya* sufren doblamiento del tallo, lo que impide el crecimiento totalmente vertical y, al realizar las mediciones aleatorias, se reflejó el incremento de la desviación estándar.

De igual forma, en la Figura 3b se presentan los resultados concernientes a la evolución del diámetro del tallo en el cultivo de *C. papaya*. Se observó un diámetro máximo de 137.8 mm en el híbrido Paulina a los 332 DDS y de 147.4 mm en el híbrido Tainung a los 213 DDS.

En la Figura 3c se exponen los resultados asociados al comportamiento del NDVI y la Fc a lo largo del ciclo del cultivo de *C. papaya* en el híbrido Paulina. Los resultados mostraron un NDVI máximo de 0.85 (213 DDS) y una Fc de 60.6 % (332 DDS). El NDVI máximo se evidenció aproximadamente al octavo mes después de la siembra, lo que coincidió con el inicio de la etapa de cosecha. Igualmente, se observó una disminución del NDVI y de la Fc desde el día 213 (DDS); esta disminución puede deberse al corte de árboles de *C. papaya* como medida de control de enfermedades (Figura 4) y el comienzo de la cosecha y senescencia del cultivo, el cual coincide con el estancamiento del diámetro del tallo (Figura 4b).

En la Figura 3d se presentan los resultados obtenidos del NDVI y la Fc a lo largo del ciclo de cultivo del híbrido Tainung. En él se observó un NDVI máximo de 0.854 (213 DDS) y una Fc máxima de 0.66 (332 DDS). Similarmente a lo observado en el híbrido Paulina, el NDVI máximo se alcanzó aproximadamente en el octavo mes, que marcó el inicio de la etapa de cosecha, seguido de una disminución gradual debido al envejecimiento de las hojas y la incidencia de plagas como ácaros. La Fc máxima se registró hacia el final del estudio, correspondiente al periodo en el cual el cultivo cubrió significativamente el suelo.

La alta desviación estándar del NDVI en los 2 híbridos se debe a que en la imagen se tienen píxeles puros de hoja (NDVI alto), píxeles puros de suelo (NDVI bajo) y píxeles puros de plástico (NDVI cercanos a 0 e incluso valores negativos).

En la Figura 5 se exponen los resultados de la evolución real del Kcb promedio obtenido a través de las ecuaciones que lo relacionan con el NDVI y la Fc a lo largo del ciclo de los híbridos del cultivo de *C. papaya*, en comparación con la curva de Kcb publicada por Chaterlán et al. (2012) y la curva ajustada (Kcb-ajus) deducida de las curvas Kcb-Fc y Kcb-NDVI. El Kcb determinado en el híbrido Paulina (Figura 5a), a partir del NDVI (Kcb-NDVI), exhibió un crecimiento aproximadamente lineal, alcanzando su valor máximo

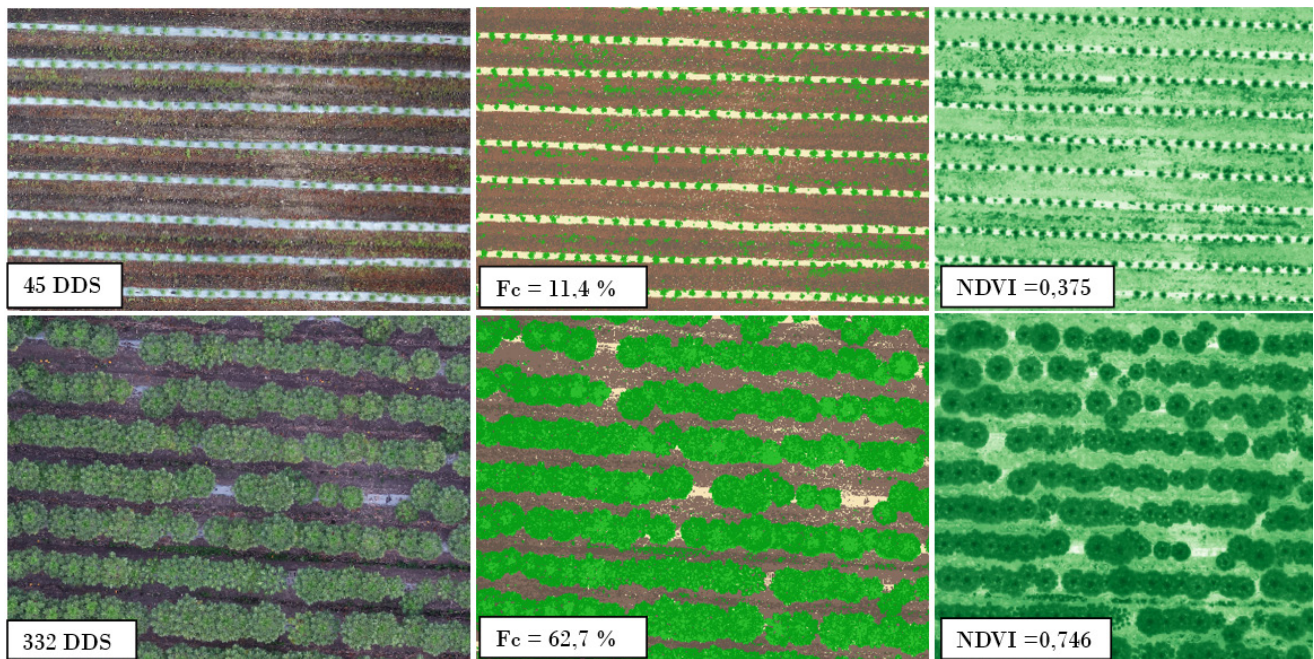


Figura 2. Ejemplo de imágenes RGB (primera columna); fracción de cobertura vegetal (Fc) (segunda columna); y NDVI (tercera columna) a los 45 y 332 días después de siembra. Fuente: elaboración propia.

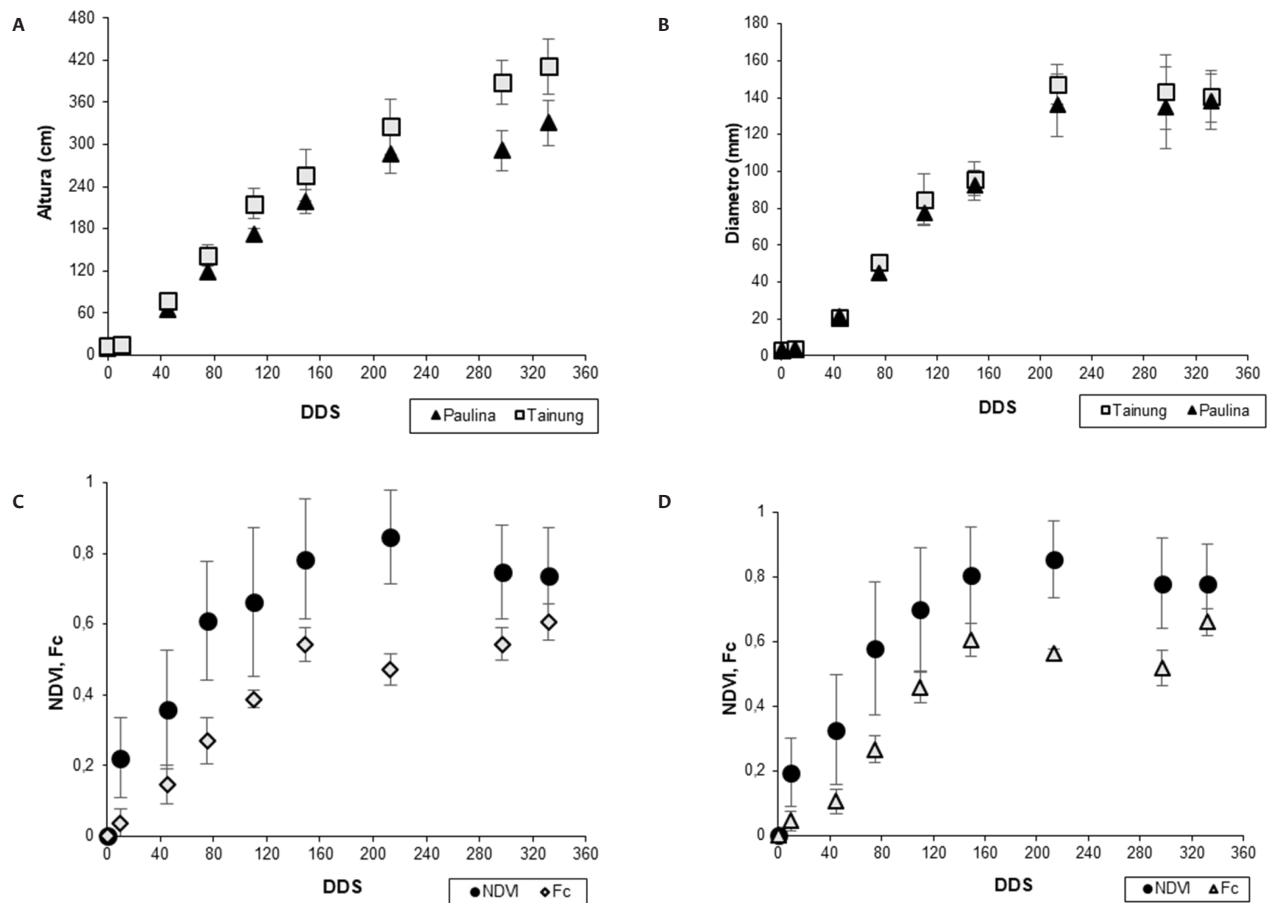


Figura 3. Evolución de altura, diámetro de tallo, NDVI y Fc durante el ciclo del cultivo. (a) evolución de altura; (b) evolución de diámetro de tallo; (c) evolución del NDVI y Fc del híbrido Paulina; y (d) NDVI y Fc del híbrido Tainung. Fuente: elaboración propia.

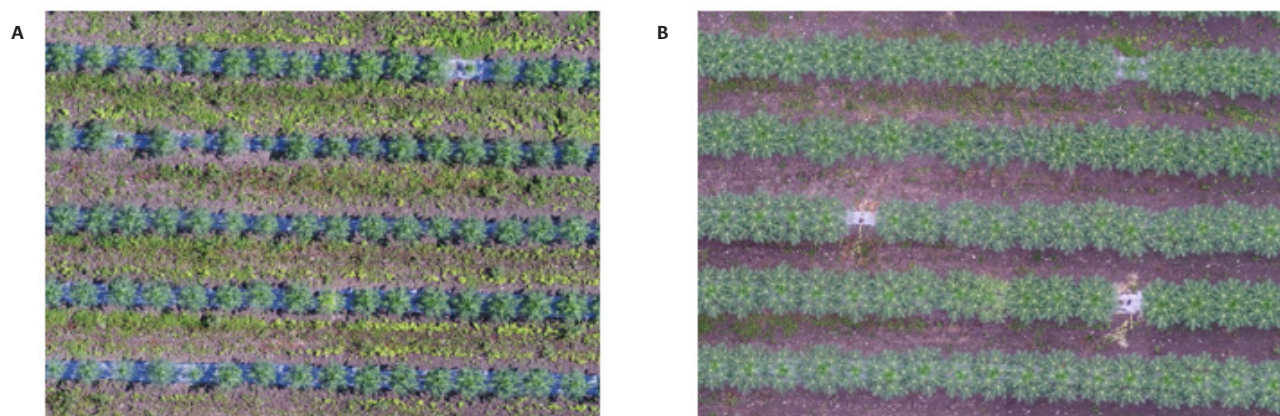


Figura 4. Poda de árboles infectados por virus en el cultivo de *C. papaya*. (a) cobertura del cultivo de *C. papaya* 4 meses DS y (b) cobertura del cultivo de *C. papaya* 7 meses DS. Fuente: elaboración propia.

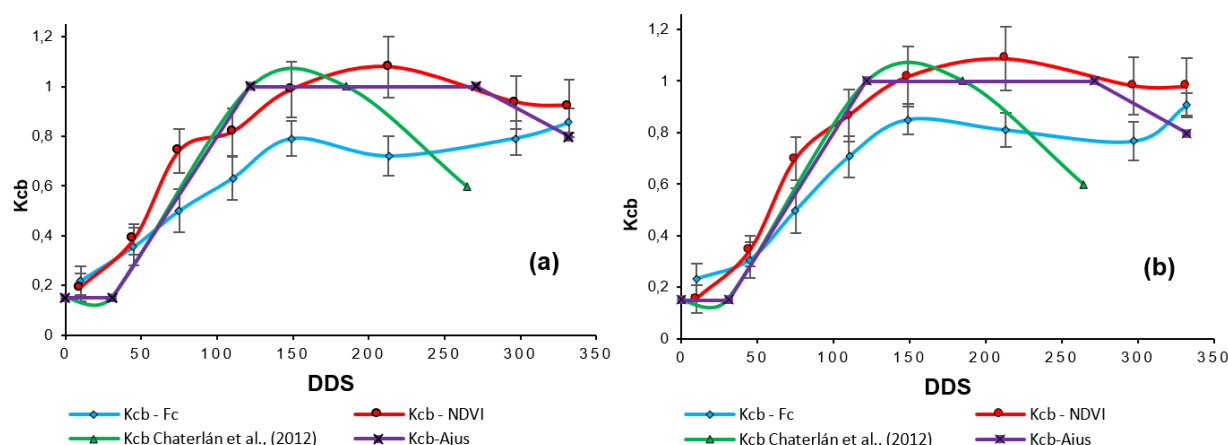


Figura 5. Evolución del coeficiente basal de cultivo (Kcb) estimado a partir de la relación lineal con la Fc (Kcb-Fc), el NDVI (Kcb-NDVI), la curva publicada por Chaterlán et al. (2012) y la curva de Kcb propuesta en este estudio (Kcb-Ajus) para los dos híbridos. Fc: (a) híbrido Paulina y (b) híbrido Tainung. Fuente: elaboración propia.

de 1.08 alrededor del octavo mes (213 DDS), seguido de una disminución gradual que mantuvo la misma tendencia que el NDVI. Por otro lado, el Kcb derivado de la Fc (Kcb-Fc) alcanzó su valor máximo de 0.85 hacia el final del estudio (332 DDS).

En la Figura 5b el Kcb-NDVI del híbrido Tainung muestra un crecimiento lineal con un máximo de 1.09 (213 DDS), el cual tiene poca diferencia con el valor máximo observado en el híbrido Paulina para la misma fecha. Por otro lado, el Kcb-Fc del híbrido Tainung alcanzó su valor máximo de 0.95 al final del estudio (332 DDS), el cual superó el valor de Kcb máximo observado en el híbrido Paulina.

La curva de Kcb determinada en este estudio a partir del NDVI y la Fc muestra diferencias notables en la duración de las etapas del cultivo en comparación con la curva reportada por Chaterlán et al. (2012). En la curva Kcb de Chaterlán et al. (2012) el Kcb inicial tiene un crecimiento similar al encontrado en este estudio, y se asemejan en el valor máximo

del Kcb medio, pero diferente periodo de duración. También existe una diferencia significativa en el Kcb final, pues la curva del Kcb de la literatura muestra un decrecimiento rápido, mientras que en este estudio se evidenció que la curva de Kcb, en los 2 híbridos de *C. papaya*, decrece lentamente.

En el híbrido Paulina las curvas Kcb-Fc y Kcb-NDVI al inicio del ciclo presentaron un crecimiento y valor similar. Posteriormente la curva Kcb-Fc presentó valores inferiores a la curva Kcb-NDVI al igual que en el híbrido Tainung.

Para la determinación de las necesidades hídricas con el modelo FAO-56, teniendo en cuenta la respuesta en el tiempo de la relación Kcb-NDVI, Kcb-fc y la duración de las etapas consideradas por Chaterlán et al. (2012) para el cultivo de *C. papaya*, se estableció la duración (días) de las etapas del cultivo (Tabla 2a). También se estableció una longitud de etapa única para ambos híbridos debido a la respuesta similar que mostraron en el tiempo tanto el Kcb-NDVI

como en el Kcb-Fc. De igual forma, se ajustaron los valores de Kcb comparando los resultados obtenidos de Kcb de los modelos lineales y el Kcb encontrado en la literatura, como se muestran en las Figuras 5a y 5b y en la Tabla 2b, para facilitar su acceso y utilización en investigaciones posteriores.

En la Figura 6 se presenta la información proporcionada por el agricultor sobre la producción mensual obtenida del cultivo de papaya (sin discriminar por híbrido), durante el estudio y hasta febrero de 2024; la figura presenta los datos desde el séptimo mes, cuando comenzó la etapa de cosecha. Cuando terminó el periodo de estudio (diciembre) no se cortó el cultivo, sin embargo, en febrero de 2024 se cortó el híbrido Tainung por problemas fitosanitarios y por la altura del cultivo, que excedió la adecuada para la recolección del fruto. Esta información refleja una producción total de 92.3 toneladas por hectárea (TPH) de *C. papaya* en el tiempo de estudio (a diciembre del 2023) y una producción total de 105.2 TPH a febrero de 2024.

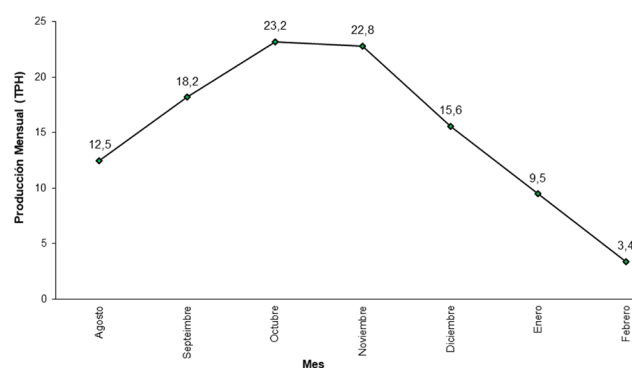


Figura 6. Producción mensual de *C. papaya* hasta febrero de 2024 en toneladas por hectárea (TPH), reportada por Proterra. Fuente: elaboración propia.

Con las variables reportadas por la estación meteorológica Palmira La Rita, el modelo FAO-56 y el Kcb determinado en este trabajo (Kcb-Ajus de la Figura 5), se determinó que las necesidades hídricas del cultivo de *C. papaya* en 12 meses fue de 1278 mm, de los cuales, en este estudio, 54.6 % fueron aportados por riego. Con la información de necesidades hídricas y la producción observada, se puede inferir que se requieren 0.14 m³ de agua para producir 1 kg de papaya.

Conclusiones

La obtención de la curva del coeficiente de cultivo basal (Kcb) para los híbridos de *C. papaya* Tainung y Paulina, a partir del índice de vegetación NDVI y la Fc, representa un avance significativo en la agricultura. Con estas aproximaciones de Kcb los agricultores

podrán calcular la evapotranspiración del cultivo utilizando el Modelo FAO-56, el cual optimiza el uso de agua mediante la programación y aplique de la cantidad adecuada en el momento oportuno, lo que mejora la eficiencia del riego, maximiza el rendimiento del cultivo y promueve la sostenibilidad agrícola en la producción de *C. papaya*.

El estudio valida la utilidad de las imágenes multispectrales de dron y la relación entre NDVI y Kcb como herramientas efectivas para monitorear el estado fisiológico de los cultivos y tomar decisiones informadas en el manejo agrícola.

Las diferencias encontradas con respecto a la curva de Kcb reportada en la literatura resaltan la importancia de considerar variaciones ambientales, como temperatura, viento, fotoperiodo, altitud, humedad relativa y calidad del suelo, para determinar el Kcb, para lo cual los modelos basados en el NDVI y la Fc son una estrategia sencilla.

Es importante continuar con la validación de la duración de las etapas y los valores de Kcb para otros híbridos de *C. papaya*, así como también evaluar condiciones ambientales diferentes.

Referencias

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Smith, M., Raes, D., & Wright, J. L. (2005). FAO-56 Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evaporation from Soil and Application Extensions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 2–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(2))
- Bispo, R. C., Hernandez, F. B. T., Gonçalves, I. Z., Neale, C. M. U., & Teixeira, A. H. C. (2022). Remote sensing based evapotranspiration modeling for sugarcane in Brazil using a hybrid approach. *Agricultural Water Management*, 271, 107763. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107763>
- Campostrini, E., Schaffer, B., Ramalho, J. D. C., González, J. C., Rodrigues, W. P., Da Silva, J. R., & Lima, R. S. N. (2018). Environmental Factors Controlling Carbon Assimilation, Growth, and Yield of Papaya (*Carica papaya* L.) Under Water-Scarcity Scenarios. *Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment: Tools, Strategies, and Challenges for Woody Crops*, 481–505. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813164-0.00019-3>
- Cao, S., Danielson, B., Clare, S., Koenig, S., Campos-Vargas, C., & Sanchez-Azofeifa, A. (2019). Radiometric calibration assessments for UAS-borne multispectral cameras: Laboratory and field protocols. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 149, 132–145. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2019.01.016>
- Chaterlán, Y., Rosa, R., Hernández, G., López, T., & Pereira, L. S. (2012). Estimación de las necesidades hídricas de la papaya utilizando la aproximación de los coeficientes culturales duales. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(3), 12–17. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542012000300002&lng=es&nrm=iso&tng=es
- Chen, N., Li, X., Šimůnek, J., Shi, H., Ding, Z., & Zhang, Y. (2020). The effects of biodegradable and plastic film mulching on nitrogen uptake, distribution, and leaching in a drip-irrigated sandy field. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 292, 106817. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2020.106817>

- Cihlar, J., Dobson, M. C., Schmugge, T., Hoogeboom, P., Janse, A. R., Baret, F., Guyot, G., Le Toan, T., & Pampaloni, P. (1987). Review Article Procedures for the description of agricultural crops and soils in optical and microwave remote sensing studies. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3), 427–439. <https://doi.org/10.1080/01431168708948651>
- Coelho, E. F., Santos, D. L., Lima, L. W. F. de, Castricini, A., Barros, D. L., Filgueiras, R., & da Cunha, F. F. (2022). Water regimes on soil covered with plastic film mulch and relationships with soil water availability, yield, and water use efficiency of papaya trees. *Agricultural Water Management*, 269, 107709. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107709>
- de Freitas, E. M., da Silva, G. H., Guimarães, G. F. C., Vital, T. N. B., Vieira, J. H., da Silveira, F. A., Gomes, C. N., & da Cunha, F. F. (2023). Evapotranspiration and crop coefficient of *Physalis peruviana* cultivated with recycled paper as mulch. *Scientia Horticulturae*, 320, 112212. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2023.112212>
- Elshikha, D. E. M., Hunsaker, D. J., Waller, P. M., Thorp, K. R., Dierig, D., Wang, G., Cruz, V. M. V., Katterman, M. E., Bronson, K. F., Wall, G. W., & Thompson, A. L. (2022). Estimation of direct-seeded guayule cover, crop coefficient, and yield using UAS-based multispectral and RGB data. *Agricultural Water Management*, 265, 107540. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107540>
- Guerrero, J. A., & Torres, E. A. (2022). Ajuste del coeficiente basal de cultivo (Kcb) de frijol (*Phaseolus vulgaris*) mediante teledetección. <https://doi.org/10.31910/2022.1832>
- Guerrero-Gutierrez, J. A., & Torres, E. A. (2022). Ajuste del coeficiente basal de cultivo (Kcb) de frijol (*Phaseolus vulgaris*) mediante teledetección. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 25(2). <https://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.1832>
- Helman, D., Bonfil, D. J., & Lensky, I. M. (2019). Crop RS-Met: A biophysical evapotranspiration and root-zone soil water content model for crops based on proximal sensing and meteorological data. *Agricultural Water Management*, 211, 210–219. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.09.043>
- Jiang, R., Sanchez-Azofeifa, A., Laakso, K., Wang, P., Xu, Y., Zhou, Z., Luo, X., Lan, Y., Zhao, G., & Chen, X. (2021). UAV-based partially sampling system for rapid NDVI mapping in the evaluation of rice nitrogen use efficiency. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125705. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125705>
- Ortiz, E., & Torres, E. A. (2018). Assessing water demand with remote sensing for two coriander varieties. *Agronomía Colombiana*, 36(3), 266–273. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v36n3.71809>
- Ruas, K. F., Baroni, D. F., de Souza, G. A. R., Bernado, W. de P., Paixão, J. S., dos Santos, G. M., Filho, J. A. M., de Abreu, D. P., de Sousa, E. F., Rakocovic, M., Rodrigues, W. P., & Campostrini, E. (2022). A Carica papaya L. genotype with low leaf chlorophyll concentration copes successfully with soil water stress in the field. *Scientia Horticulturae*, 293, 110722. <https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2021.110722>
- Segovia, D. A., Rodríguez, L., & Zubelzu, S. (2019). Water use efficiency of corn among the irrigation districts across the Duero river basin (Spain): Estimation of local crop coefficients by satellite images. *Agricultural Water Management*, 212, 241–251. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.08.042>
- Tang, J., Han, W., & Zhang, L. (2019). UAV Multispectral Imagery Combined with the FAO-56 Dual Approach for Maize Evapotranspiration Mapping in the North China Plain. *Remote Sensing* 2019, Vol. 11, Page 2519, 11(21), 2519. <https://doi.org/10.3390/RS11212519>
- van Genuchten, M., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*.
- Vanino, S., Pulighe, G., Nino, P., de Michele, C., Bolognesi, S. F., & D'Urso, G. (2015). Estimation of Evapotranspiration and Crop Coefficients of Tendone Vineyards Using Multi-Sensor Remote Sensing Data in a Mediterranean Environment. *Remote Sensing* 2015, Vol. 7, Pages 14708–14730, 7(11), 14708–14730. <https://doi.org/10.3390/RS71114708>
- Veramendi, W. N. C., & Cruvinel, P. E. (2024). Method for maize plants counting and crop evaluation based on multispectral images analysis. *Computers and Electronics in Agriculture*, 216, 108470. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2023.108470>
- Zhang, Y., Han, W., Zhang, H., Niu, X., & Shao, G. (2023). Evaluating maize evapotranspiration using high-resolution UAV-based imagery and FAO-56 dual crop coefficient approach. *Agricultural Water Management*, 275, 108004. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.108004>

Dominancia de *Dichondra sericea* y diversidad arvense mediante manejo manual en cultivo de banano orgánico en Ecuador

Dominance of *Dichondra sericea* and weed diversity under manual management in organic banana cultivation in Ecuador

Santiago Sánchez Tigrero ^{1,4}, Juan Moreira Castro ^{2,5}, Luz García Cruzatty ^{3,6}.

¹Tanabe S. A., Ecuador. ²Jardín Botánico. Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador. ³Facultad de Ingeniería Agronómica. Universidad Técnica de Manabí. Portoviejo, Ecuador. ⁴✉ santiagoomador@yahoo.com; ⁵✉ juanmoreiracastro@hotmail.com; ⁶✉ luz.garcia@utm.edu.ec



<https://doi.org/10.15446/acag.v73n1.115606>

2024 | 73-1 p 107-115 | ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118 | Rec.: 2024-07-05 Acep.: 2025-01-29

Resumen

Ecuador, el principal productor mundial de banano, enfrenta desafíos para el manejo sostenible de plantas arvenses en sistemas orgánicos, en los que existe escasa información científica sobre la diversidad de arvenses. Este estudio evaluó el impacto de técnicas manuales de control de malezas (chapia superficial, selectiva, roza con machete y testigo –sin control– sobre la diversidad de arvenses en un cultivo orgánico de banano en la Hacienda Tecnoban (Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador). Se realizó un inventario florístico en parcelas de 900 m² durante las épocas secas y lluviosas de 2022, gracias a lo cual se identificaron especies mediante claves taxonómicas y se calcularon índices de diversidad (Shannon, Simpson, Pielou). Se registraron 14 especies arvenses, entre las que se destacaron *Dichondra sericea* (50 % de cobertura) y *Geophila macropoda* (hasta 44 % de cobertura). Los análisis estadísticos (Kruskal-Wallis) revelaron diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$), de los cuales la chapia selectiva mantuvo la mayor diversidad al modular la dominancia de *D. sericea*. No se observaron diferencias entre épocas climáticas ($p > 0.05$), y el índice de Sørensen confirmó alta similitud florística entre tratamientos (≥ 0.86) y estabilidad estacional (≥ 0.93). Estos resultados sugieren que prácticas como la chapia selectiva preservan la diversidad arvense sin alterar la composición natural y favorecen agroecosistemas resilientes. El estudio aporta evidencia para optimizar el manejo manual de malezas en banano orgánico, ya que este equilibra la productividad frente a la conservación de la biodiversidad.

Palabras clave: agricultura orgánica, agroecosistemas tropicales, control de malezas, diversidad florística.

Abstract

Ecuador, the world's leading banana producer, faces challenges in the sustainable management of weeds in organic systems, where scientific information on their diversity is limited. This study evaluated the impact of manual weed control techniques (superficial weeding, selective weeding, machete slashing, and control [no weeding]) on weed diversity in an organic banana plantation at Hacienda Tecnoban (Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador). A floristic inventory was conducted in 900 m² plots during the dry and rainy seasons of 2022, identifying species using taxonomic keys and calculating diversity indices (Shannon, Simpson, Pielou). Fourteen weed species were recorded, with *Dichondra sericea* (50 % coverage) and *Geophila macropoda* (up to 44 %) being the most prominent. Statistical analysis (Kruskal-Wallis) revealed significant differences among treatments ($p < 0.05$), with selective weeding maintaining the highest diversity by modulating *D. sericea* dominance. No differences were observed between climatic seasons ($p > 0.05$), and the Sørensen index confirmed high floristic similarity among treatments (≥ 0.86) and seasonal stability (≥ 0.93). These results suggest that practices like selective weeding help preserve weed diversity without altering the natural composition, favoring resilient agroecosystems. The study provides evidence to optimize manual weed management in organic banana cultivation, promoting a balance between productivity with biodiversity conservation.

Keywords: Floristic diversity, organic agriculture, tropical agroecosystems, weed control.

Introducción

Ecuador se consolida como el principal productor mundial de banano (FAO, 2020; Apolo Aguilar *et al.*, 2021), lo que convierte esta producción en un pilar fundamental para la economía nacional y en una fuente crucial de empleo para miles de familias en zonas rurales. Tradicionalmente, la producción de banano se ha desarrollado en sistemas convencionales con un elevado uso de agroquímicos; sin embargo, el sector orgánico –aún en expansión– ha recibido menos atención en cuanto a la gestión integral de malezas. En este contexto, se ha asumido erróneamente que las especies arvenses compiten con el cultivo por recursos esenciales (nutrientes, agua y luz) e, incluso, que actúan como hospedadoras de plagas (Hernández & Guzmán, 2022).

No obstante, estudios recientes han evidenciado que, dentro de los sistemas orgánicos, las arvenses pueden cumplir funciones ecológicas esenciales. Por ejemplo, se ha evidenciado que ciertas especies contribuyen a conservar la humedad del suelo, prevenir la erosión y reciclar nutrientes, lo que favorece la estabilidad y resiliencia de los agroecosistemas (Pontes Junior *et al.*, 2022; Eljebri *et al.*, 2024). Además, investigaciones en otros contextos han demostrado que las prácticas agrícolas que integran el manejo manual de malezas pueden mantener, o incluso potenciar, la diversidad florística (Sánchez-Reyes *et al.*, 2024), lo cual resulta fundamental para la sostenibilidad a largo plazo.

El manejo manual de malezas, especialmente mediante técnicas como la chapia¹ selectiva, se plantea como una alternativa prometedora en cultivos orgánicos, ya que podría minimizar el uso de herbicidas y, al mismo tiempo, conservar los servicios ecosistémicos asociados a la diversidad arvense (Rivera-Ramírez *et al.*, 2021). Sin embargo, la literatura sobre el manejo sostenible de arvenses en banano orgánico es todavía limitada. Ante este vacío, el presente estudio se propone evaluar el impacto de diversas técnicas manuales de control de malezas sobre la diversidad de especies arvenses en la Hacienda Tecnoban, ubicada en Santo Domingo de los Tsáchilas, Ecuador. Se plantea la hipótesis de que la chapia selectiva favorecerá una mayor diversidad sin comprometer la cobertura vegetal, en comparación con métodos más intensivos como la roza con machete.

Esta investigación, pionera en su enfoque en banano orgánico tropical, busca aportar datos que no solo mejoren la comprensión de las interacciones entre cultivo y malezas, sino que también sirvan de base para el desarrollo de modelos de manejo

¹ El término *chapia* se emplea comúnmente en la agricultura tropical de Ecuador y otros países de América Latina para describir una técnica de control manual de malezas. Consiste en el corte superficial de la vegetación no deseada, utilizando machetes o herramientas similares, sin remover las raíces ni alterar significativamente la capa superficial del suelo. Deriva del verbo “chapear”, que según la RAE significa “cortar la maleza o ramas bajas de los árboles”.

sostenible aplicables a otros cultivos de alto valor, como el cacao y el café (Restuccia *et al.*, 2020; Chaudhary *et al.*, 2022; Nulkar, 2024).

Materiales y métodos

Área de estudio

Este estudio se realizó en la Hacienda Tecnoban, ubicada en la provincia Santo Domingo de los Tsáchilas, en el cantón La Concordia (Ecuador) (Figura 1), a 217 m s. n. m. en la zona noroccidental del Ecuador. Esta área corresponde a la zona climática lluviosa tropical, su temperatura habitual es de 20 a 35 °C. El suelo es de origen volcánico; la humedad relativa promedio es de 85.8 %; precipitación promedio anual de 3045 mm. En esta hacienda se realiza cultivo y exportación de banano desde 1995, en una extensión de 350 hectáreas.

Diseño experimental

El estudio se realizó en la Hacienda Tecnoban (0.008°S, 79.367°O), en parcelas de 900 m² dispuestas en un diseño de bloques completamente al azar con 3 repeticiones. Cada parcela se dividió en 9 subparcelas de 10 × 10 m, de las cuales 3 se muestrearon aleatoriamente. Los tratamientos evaluados fueron:

T1 – chapia superficial: corte manual de arvenses que sobrepasaban los 30 cm de altura, sin afectar la cobertura del suelo.

T2 – chapia selectiva: corte selectivo de especies leñosas y altas, permitiendo la permanencia de especies rastreras.

T3 – roza con machete: eliminación total de la vegetación a ras del suelo.

T4 – testigo sin control: parcelas sin desmalezar durante todo el periodo de estudio.

El trabajo de campo se llevó a cabo entre marzo y septiembre de 2022. Cada tratamiento se aplicó cada 6 semanas en cada época climática (seca y lluviosa).

Muestreo y análisis florístico

Unidad de muestreo: dentro de cada parcela de 900 m², se delimitaron subparcelas de 100 m², de las que se registraron los datos.

Número de muestras y repeticiones: se tomaron 3 subparcelas por parcela, para un total de 12 subparcelas por tratamiento en cada época climática.

Frecuencia de muestreo: se realizaron evaluaciones cada 4 semanas; en ellas se contabilizaron la cobertura y la abundancia relativa de cada especie.

Criterios de selección de los sitios de muestreo: las subparcelas se ubicaron de manera aleatoria dentro de cada parcela, asegurando la representatividad del área y evitando sesgos por microambientes.



Figura 1. Ubicación geográfica de la Hacienda TecnoBan, La Concordia, Ecuador.

Las muestras botánicas se recolectaron, prensaron y secaron a 60 °C durante 48 horas. La identificación se realizó mediante claves taxonómicas (Jørgensen & León-Yáñez, 1999) y la clasificación APG IV. La cobertura de cada especie se calculó como el porcentaje del área de subparcela ocupada, usando una cuadrícula de 1 × 1 m para estandarizar las mediciones.

Índices de diversidad

Para caracterizar la diversidad de arvenses en los diferentes tratamientos y épocas climáticas, se calcularon los siguientes índices:

Índice de Simpson (DDD): evalúa la dominancia de especies (Simpson, 1949).

Índice de Shannon-Wiener (H'):

mide la riqueza y equidad en la distribución de especies (Shannon, 1948).

Índice de equidad de Pielou (JJJ): determina la uniformidad en la distribución de las especies (Pielou, 1966).

Índice de similaridad de Sørensen: permite comparar la composición florística entre tratamientos (Sørensen, 1948).

Por otro lado, los índices se calcularon mediante las siguientes fórmulas:

Índice de Shannon-Wiener (H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^S (p_i \ln p_i)$$

Donde p_i es la proporción de individuos de la especie i , y S es el número total de especies.

Índice de Simpson (D):

$$D = \sum_{i=1}^S p_i^2$$

Donde valores altos indican mayor diversidad.

Equidad de Pielou (J):

$$J' = \frac{H'}{\ln S}$$

Donde H es el índice de Shannon y S la riqueza de especies.

Índice de Sørensen:

$$S = \frac{2C}{A+B}$$

Donde C es el número de especies comunes entre dos sitios, y A y B son las especies totales en cada sitio.

Análisis estadístico

Las diferencias entre tratamientos y épocas se evaluaron con ANOVA de Kruskal-Wallis y pruebas *post-hoc* de Dunn (paquete 'PMCMRplus' en R v4.3.1). Para evaluar diferencias en la composición de especies entre tratamientos y épocas climáticas, se utilizó el índice de Sørensen.

Resultados

Composición florística y abundancia relativa

Se identificaron 14 especies arvenses, agrupadas en 12 familias botánicas (Tabla 1), entre las cuales *Dichondra sericea* (Convolvulaceae) y *Geophila macropoda* (Rubiaceae) fueron las más dominantes, con coberturas medias del 50 % y 34 %, respectivamente. *D. sericea* mantuvo dominancia en todos los tratamientos, incluso sin control (T4). En época lluviosa, *D. sericea* alcanzó hasta 59 % de cobertura bajo chapia selectiva (T2), mientras *G. macropoda* predominó en roza (T3) con 44 % (Tabla 2). Especies como *Cyperus luzulae* y *Borreria laevis* mostraron coberturas marginales (<3 %), y desaparecieron en algunos tratamientos (*C. luzulae* en T3-seca).

La Figura 2 evidencia que *D. sericea* alcanzó su máxima cobertura (61 %) en chapia selectiva (T2) durante la época seca, mientras *G. macropoda* fue más abundante en roza (T3) en época lluviosa (44 %). Entre las especies que tuvieron menor incidencia: *T. cumanensis*, *F. aestuans*, *C. achyranthoides*, *B. laevis* y *C. luzulae*, esta última desapareció completamente cuando se realizó chapia con machete (Tabla 2).

Diversidad y efectos del manejo manual

Los resultados de la Tabla 3 evidencian que el manejo manual de malezas, particularmente la chapia selectiva (T3), favorece la mayor diversidad arvense en el cultivo orgánico de banano, con un índice de Simpson de 2.6 y una equidad de Pielou (J) de 0.59 en época seca, lo que refleja una comunidad

Tabla 1. Especies arvenses identificadas en parcelas de muestreo en cultivo orgánico de banano en la Hacienda Tecnoban, La Concordia, Ecuador, 2022

Nombre común	Nombre científico	Familia
Orejilla blanca	<i>Dichondra sericea</i> Sw.	Convolvulaceae
Orejuela de ratón	<i>Geophila macropoda</i> (Ruiz & Pav.) DC.	Rubiaceae
Hierba de sapo	<i>Borreria laevis</i> (Lam.) Griseb.	Rubiaceae
Mollejita	<i>Asystasia gangetica</i> (L.) T. Anderson	Acanthaceae
Siempre viva	<i>Commelina erecta</i> L.	Commelinaceae
Camotillo	<i>Tripogandra cumanensis</i> (Kunth) Woodson	Commelinaceae
Coquito estrella	<i>Cyperus luzulae</i> (L.) Retz	Cyperaceae
Helecho	<i>Dryopteris erythrosora</i> (D.C. Eaton) Kuntze	Dryopteridaceae
Filodendro	<i>Philodendron</i> sp.	Araceae
Chusque	<i>Pseudechinolaena polystachya</i> (Humb., Bonpl. & Kunth) Stapf.	Poaceae
Chancapiedra	<i>Phyllanthus tenellus</i> Roxb.	Phyllanthaceae
Botón de oro	<i>Melampodium divaricatum</i> (Rich. ex Rich.) DC.	Asteraceae
Ortigailla blanca	<i>Fleurya aestuans</i> (L.) Gaudich. ex Miq.	Urticaceae
Pega pega	<i>Cyathula achyranthoides</i> (Kunth) Moq.	Amaranthaceae



Figura 2. Arvenses en el cultivo de banano orgánico (nótese dominancia de *Dichondra sericea*), en la Hacienda Tecnoban, La Concordia, Ecuador, 2022 (época seca, 3 semanas después de la chapia selectiva).

vegetal equilibrada y resiliente. En contraste, la roza con machete (T2) mostró la menor diversidad (Simpson= 1.85) debido a la dominancia marcada de *Dichondra sericea* (61 % de cobertura), especie que incrementó su prevalencia en época seca. Aunque la época lluviosa registró mayor abundancia total (96.7 % en T4), la época seca no redujo la riqueza de especies (14 spp.), pero sí reforzó la competitividad de taxones adaptados a sequía. Estos hallazgos demuestran que prácticas como la chapia selectiva, al preservar especies rastreras y modular la dominancia, son clave para mantener agroecosistemas biodiversos y sostenibles en banano orgánico.

La cobertura de arvenses no mostró diferencias estadísticas significativas entre épocas climáticas ($p>0.05$), ya que se mantuvo estable tanto en la época seca como lluviosa (Tabla 4). *D. sericea* fue la especie dominante en todos los tratamientos, con coberturas del 47 % (época lluviosa) y 48 % (época seca), seguida de *G. macropoda*, que alcanzó el 37 % y 33 % en las mismas épocas (Figura 3).

La chapia selectiva (T2) favoreció la mayor abundancia de *D. sericea*, pues registró un 57.5 % de cobertura en época lluviosa y 56.6 % en época seca. Por su parte, *G. macropoda* mostró su máxima cobertura (42 %) bajo el mismo tratamiento (T2) durante la época seca, lo que sugiere una adaptación diferencial a las intervenciones manuales. En contraste, el testigo (T4) y la roza con machete (T3) mostraron menor variabilidad en la distribución de especies, lo que refuerza la dominancia de *D. sericea*.

Estos resultados, expuestos en la Figura 3, evidencian que las prácticas de manejo modularon la abundancia relativa de las especies, pero no alteraron la composición florística entre épocas.

Las diferencias significativas entre tratamientos (Kruskal-Wallis, $p<0.05$) indican que el método de control influye en la diversidad arvense, mientras que la ausencia de diferencias entre épocas ($p>0.05$) sugiere estabilidad estacional (Shannon: $H= 9.24$, $p= 0.026$; Simpson: $H= 8.75$, $p= 0.033$) (Tabla 4). Las pruebas *post-hoc* de Dunn revelan que la roza con machete (T2) redujo significativamente la diversidad si se compara con la chapia selectiva (T3) ($p= 0.018$) y el testigo (T4) ($p= 0.032$). No se encontraron diferencias entre T3 (chapia selectiva) y T4 (testigo) ($p= 0.415$), lo cual sugiere que este método mantiene una diversidad comparable a la de un sistema sin intervención (Tabla 5).

Estabilidad florística y similitud estacional

El índice de Sørensen destacó alta similitud entre tratamientos (≥ 0.86) y épocas (≥ 0.93), lo que indica que ni el manejo manual ni la estacionalidad alteraron drásticamente la comunidad arvense (Tabla 6). Por ejemplo, T1 (chapia superficial) y T4 (testigo) compartieron el 100 % de especies en época lluviosa; esto confirma la resiliencia del sistema ante intervenciones moderadas.

Discusión

Efecto del manejo de arvenses en la diversidad vegetal

Los resultados indican que el manejo manual de arvenses influye significativamente en la diversidad y composición de la vegetación arvense en cultivos de banano orgánico. La riqueza de especies se mantuvo

Tabla 2. Abundancia relativa (%) de especies arvenses durante las épocas seca y lluviosa, recolectadas mediante manejo manual¹ en parcelas de muestreo en cultivo orgánico de banano, Hacienda Tecnoban, La Concordia, Santo Domingo, Ecuador, 2022

Especies Tratamientos ¹	Época lluviosa				Época seca			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
<i>Dichondra sericea</i> Sw.	54.7	58.9	41.8	54.2	60.1	60.5	42.7	50.1
<i>Geophila macropoda</i> (Ruiz & Pav.) DC.	30.3	25.0	43.6	31.4	27.7	24.5	37.3	34.5
<i>Asystasia gangética</i> (L.) T. Anderson	3.2	0.7	0.3	1.2	1.3	0.7	2.2	1.8
<i>Commelina erecta</i> L.	0.3	1.6	1.0	2.0	0.5	1.3	1.1	2.3
<i>Cyperus luzulae</i> (L.) Retz	0.0	3.4	0.5	0.9	0.0	3.4	0.5	1.0
<i>Dryopteris erythrosora</i> (D.C. Eaton) Kuntze	1.9	1.2	1.6	1.4	1.9	1.2	1.9	2.1
<i>Philodendron</i> sp	2.1	3.1	4.2	2.3	1.9	3.2	4.4	2.1
<i>Pseudechinolaena polystachya</i> (Humb., Bonpl. & Kunth) Stapf.	2.9	2.3	3.1	0.9	1.3	2.1	3.3	0.8
<i>Tripogandra cumanensis</i> (Kunth) Woodson	0.8	0.5	0.5	1.7	0.8	0.3	1.1	1.6
<i>Phyllanthus tenellus</i>	1.3	0.8	0.9	1.4	1.3	1.1	1.6	1.3
<i>Melampodium divaricatum</i> (Rich. ex Rich.) DC.	0.8	0.5	0.3	0.6	0.8	0.5	0.8	0.5
<i>Fleurya aestuans</i> (L.) Gaudich. ex Miq.	0.5	0.8	0.5	0.6	1.1	0.8	0.5	0.5
<i>Cyathula achyranthoides</i> (Kunth) Moq.	0.3	0.8	0.6	0.9	0.3	0.5	1.1	0.8
<i>Borreria laevis</i> (Lam.) Griseb.	0.8	0.5	1.0	0.6	1.1	0.0	1.4	0.5

¹Tratamientos: T1= chapia, T2= chapia selectiva, T3= roza con machete, T4= testigo sin control.

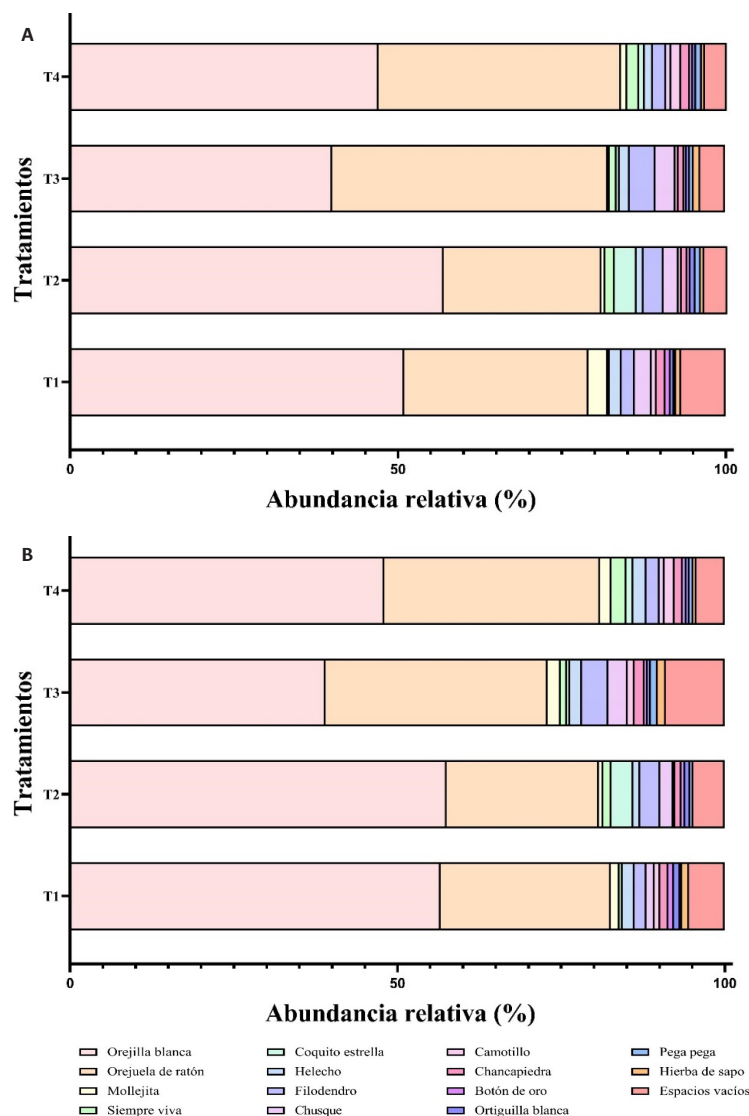


Figura 3. Abundancia de especies arvenses en época lluviosa (a) y época seca (b), sometidas a diferentes tratamientos (T1= chapia, T2= chapia selectiva, T3= roza con machete, T4= testigo sin control) en cultivo orgánico de banano en la Hacienda Tecnoban, La Concordia, Ecuador, 2022.

Tabla 3. Índices de diversidad de especies arvenses en cultivo orgánico de banano en la Hacienda Tecnoban, La Concordia, Ecuador, 2022

Tratamientos ¹	Época lluviosa				Época seca			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
Riqueza (n.º de especies)	14	15	15	15	14	14	14	14
Abundancia absoluta (%)	93.2	96.5	96.2	96.7	94.5	95.2	91.0	95.7
Índice de Simpson ²	2.15	1.92	2.45	2.30	2.10	1.85	2.60	2.20
Índice de Shannon	1.47	1.42	1.43	1.40	1.51	1.45	1.55	1.48
Equidad (Evenness) de Pielou	0.56	0.53	0.53	0.52	0.57	0.55	0.59	0.56

¹Tratamientos: T1= chapia, T2= chapia selectiva, T3= roza con machete, T4= testigo sin control.

²El índice de Simpson se calculó como la inversa de la suma de los cuadrados de las proporciones.

Tabla 4. Resultados del análisis de Kruskal-Wallis para diversidad de especies arvenses bajo manejo manual en un cultivo de banano orgánico en La Concordia, Ecuador, 2022

Factor	Índice	Estadístico H	Valor p
Tratamientos ¹	Shannon (H')	9.24	0.026*
	Simpson (1/Σpi ²)	8.75	0.033*
Épocas (seca y lluviosa)	Shannon (H')	1.82	0.177
	Simpson (1/Σpi ²)	1.45	0.229

¹Tratamientos: T1= chapia superficial, T2= chapia selectiva, T3= roza con machete y T4= testigo sin control. Valores significativos (p<0.05).

estable entre tratamientos, pero la cobertura relativa y la equidad variaron según el tipo de manejo. La chapia selectiva (T3) mostró la mayor diversidad florística (D= 2.45-2.60), lo cual valida su eficacia para modular la dominancia de *Dichondra sericea* y preservar especies funcionales en sistemas de banano

orgánico. En contraste, la roza con machete (T2) y la chapia con machete (T1) tendieron a favorecer la proliferación de especies altamente competitivas, como *Dichondra sericea* y *Geophila macropoda*. Estos hallazgos concuerdan con estudios recientes que destacan el impacto del manejo en la estructura de comunidades de malezas en cultivos tropicales (Restuccia *et al.*, 2020; Rivera-Ramírez *et al.*, 2021) y se alinean con evidencia presentada en investigaciones recientes (Alarcón Villora *et al.*, 2019; Eljebri *et al.*, 2024).

Función ecológica de las arvenses en sistemas orgánicos

Las arvenses no solo representan un desafío para el manejo del cultivo, sino que cumplen funciones ecológicas esenciales. La dominancia de *Dichondra sericea* y *Geophila macropoda* sugiere que estas especies actúan como cobertura vegetal, ayudando en la conservación de la humedad del suelo, la prevención de la erosión y el reciclaje de nutrientes (Murillo *et al.*, 2016). Además, se ha observado que ciertas malezas pueden ofrecer hábitats para insectos benéficos y contribuir a la estabilidad del agroecosistema (Pontes

Junior *et al.*, 2022). Estudios recientes han ampliado el entendimiento de estos roles ecológicos en sistemas orgánicos (Balah, 2021; Sánchez-Reyes *et al.*, 2024; Blanco-Valdés, 2016), lo que refuerza la idea de que un manejo adecuado no debe eliminar la diversidad, sino regularla para maximizar servicios ecosistémicos.

Comparación con estudios previos y análisis de diversidad

El uso combinado de índices (Simpson, Shannon y equidad de Pielou) permitió evaluar en profundidad la estructura de la comunidad arvense. El índice de Shannon evidenció que la diversidad total fue mayor en tratamientos con manejo menos disruptivo, mientras que el índice de Simpson reflejó la dominancia en tratamientos con mayor intervención. Este patrón es similar al reportado en estudios de otros cultivos orgánicos tropicales, en los que se observa que las prácticas de manejo pueden modular tanto la riqueza como la distribución de las especies (González *et al.*, 2023). Además, la aplicación de índices beta, como el de Sørensen, confirmó que las diferencias en la composición de especies entre tratamientos son sutiles, lo que indica una alta similitud florística. La integración de nuevos enfoques analíticos (Agüero-Alvarado *et al.*, 2018; Chaudhary *et al.*, 2022) sugiere que la evaluación multivariada podría aportar mayor resolución a futuros estudios.

Implicaciones para el manejo del banano orgánico

Desde el punto de vista práctico, estos hallazgos tienen importantes implicaciones para la producción de banano orgánico en Ecuador. La chapia selectiva (T3) se revela como la estrategia más equilibrada, ya que conserva una diversidad moderada y reduce la dominancia excesiva de *Dichondra sericea*, lo que favorece la funcionalidad del sistema y la conservación de servicios ecosistémicos esenciales. Esta estrategia se alinea con las tendencias internacionales que

Tabla 5. Pruebas post-hoc de Dunn (comparaciones completas) de especies arvenses bajo manejo manual en el cultivo de banano orgánico en La Concordia, Ecuador, 2022

Comparación	Índice	Valor p
T1 vs. T2	Shannon (H')	0.045*
T1 vs. T3	Shannon (H')	0.210
T1 vs. T4	Shannon (H')	0.180
T2 vs. T3	Shannon (H')	0.018*
T2 vs. T4	Shannon (H')	0.032*
T3 vs. T4	Shannon (H')	0.415

Nota: ajuste de Bonferroni para comparaciones múltiples. *Valores significativos ($p < 0.05$). T = chapia superficial, T2 = chapia selectiva, T3 = roza con machete y T4 = testigo sin control.

Tabla 6. Índice de Sørensen de similitud de especies arvenses entre tratamientos¹ (manejo manual) y épocas climáticas en cultivo orgánico de banano en La Concordia, Ecuador, 2022

Comparación	Especies en común	Índice de Sørensen	Interpretación
T1-lluviosa vs. T2-lluviosa	13	0.93	Muy alta similitud
T1-lluviosa vs. T3-lluviosa	12	0.86	Alta similitud
T1-lluviosa vs. T4-lluviosa	14	1.00	Comunidades idénticas
T2-lluviosa vs. T3-lluviosa	11	0.79	Moderada-alta similitud
T2-lluviosa vs. T4-lluviosa	12	0.86	Alta similitud
T3-lluviosa vs. T4-lluviosa	13	0.93	Muy alta similitud
T1-lluviosa vs. T1-seca	14	1.00	Comunidades idénticas
T2-lluviosa vs. T2-seca	13	0.93	Muy alta similitud
T3-lluviosa vs. T3-seca	13	0.93	Muy alta similitud
T4-lluviosa vs. T4-seca	14	1.00	Comunidades idénticas

¹Tratamientos: T1 = chapia superficial, T2 = chapia selectiva, T3 = roza con machete y T4 = testigo sin control.

promueven prácticas de manejo sostenible y el uso reducido de herbicidas (Ramos *et al.*, 2011; Hussain *et al.*, 2021; Nulkar, 2024). Por ello, se recomienda que los productores consideren este método para optimizar tanto la productividad como la resiliencia del agroecosistema.

Limitaciones y futuras líneas de investigación

Si bien el presente estudio aporta evidencia sobre el impacto del manejo manual en la diversidad arvense, se reconocen algunas limitaciones. La investigación se realizó en una única finca y durante un periodo específico, lo que no permite capturar variaciones interanuales o espaciales. Futuros estudios deberían evaluar el efecto acumulativo del manejo manual a lo largo de varios ciclos agrícolas y considerar otras variables ambientales, como la humedad del suelo, la actividad de la microbiota y la presencia de insectos benéficos. Además, se sugiere ampliar la comparación con otros cultivos orgánicos (por ejemplo, cacao y café) para validar si los patrones observados son generalizables en sistemas tropicales (Romaneckas *et al.*, 2021; Eljebri *et al.*, 2024; Sánchez-Reyes *et al.*, 2024).

Conclusiones

Se identificaron 14 especies arvenses en el cultivo orgánico de banano, con predominio de *Dichondra sericea* (50 % de cobertura), lo cual confirma su adaptabilidad a distintos manejos. Los resultados validan la hipótesis inicial, ya que demuestran que la chapia selectiva (T3) es la estrategia más equilibrada, pues modula la dominancia de *D. sericea* y mantiene una mayor diversidad florística sin comprometer la productividad. Esta práctica favorece agroecosistemas resilientes, al conservar especies funcionales que contribuyen a la retención de humedad, prevención de erosión y hábitats para fauna benéfica.

El estudio aporta evidencia clave para optimizar el manejo manual de malezas en banano orgánico, ya que este equilibra la producción frente a la conservación de biodiversidad. Sin embargo, se recomienda extender la investigación a múltiples ciclos agrícolas y localidades para evaluar la estabilidad a largo plazo. Estos hallazgos respaldan la adopción de prácticas sostenibles en el sector bananero ecuatoriano que estén alineadas con las demandas globales de agricultura orgánica y conservación de agroecosistemas.

Declaraciones éticas: los autores declaran no tener conflictos de interés.

Agradecimientos: el presente estudio fue financiado por la empresa Tecnoban S. A.

Referencias

- Agüero-Alvarado, R.; Rodríguez-Ruiz, A.; González-Lutz, M.; Portuguese-García, P. & Brenes-Prendas, S. (2018). Abundancia y cobertura de arvenses bajo manejo convencional y orgánico de café y banano. *Agronomía Mesoamericana*, 29(1), 85. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i1.28053>
- Alarcón Villora, R.; Sánchez Álvarez, A. M. & Hernández-Plaza, E. (2019). Manejo y diversidad de las comunidades arvenses en las estepas cerealistas: propuestas para una gestión sostenible. *Ecosistemas*, 28(3), 36-45. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1821>
- Apolo Aguilar, D.; Vite Cevallos, H. & Carvajal Romero, H. (2021). Análisis de la producción bananera pre y pos pandemia de la "Asociación "Asocobaoro" periodo 2019-2020. *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas*, 4(2), 128-135. <https://doi.org/10.62452/5sy8jj63>
- Balah, M. A. (2021). Multi-task of weed plants in desert environment. En A. A. Elkhoully y A. Negm (eds.), *Management and development of agricultural and natural resources in Egypt's desert* (pp. 267-290). Springer Water, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73161-8_10
- Blanco-Valdés, Y. (2016). El rol de las arvenses como componente en la biodiversidad de los agroecosistemas. *Cultivos Tropicales*, 37(4), 34-56. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.10964.19844>
- Chaudhary, A.; Chhokar, R. S. & Singh, S. (2022). Integrated weed management in wheat and barley: Global perspective. En P. L. Kashyap *et al.* (eds.), *New horizons in wheat and barley research* (pp. 545-615). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4134-3_20
- Eljebri, S.; Bouskout, M.; Ouahmane, L.; Abdelmajid, Z. & Rachid, T. (2024). Floristic diversity and ecological characteristics of weeds in irrigated agro-system with a Mediterranean climate. *Vegetos*. <https://doi.org/10.1007/s42535-024-00834-2>
- FAO. (2020). Análisis del mercado del banano 2018. <https://www.fao.org/3/ca5626es/CA5626ES.PDF>
- Hernández, V. & Guzmán, R. (2022). Diversidad de especies de plantas arvenses en tres monocultivos del Bajío, México. *Polibotánica*, 1(53). <https://doi.org/10.18387/polibotanica.53.5>
- Hussain, M. I.; Abideen, Z.; Danish, S.; Asghar, M. A. & Iqbal, K. (2021). Integrated weed management for sustainable agriculture. En E. Lichtfouse (eds.), *Sustainable Agriculture Reviews* 52 (pp. 367-393). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73245-5_11
- Jørgensen, P. M.; & León-Yanes, S. (Eds.). (2019). *Catalogue of the vascular plants of Ecuador* (Monographs in Systematic Botany from the Missouri Botanical Garden, Vol. 75). Missouri Botanical Garden Press.
- Murillo, J.; Méndez-Estrada, V. & Brenes Prendas, S. (2016). Efecto de *Geophila macropoda* (Rubiaceae) como arvense de cobertura en la erosión hídrica en bananales de Guápiles, Limón, Costa Rica. *Cuadernos de Investigación UNED*, 8(2), 217-223. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9354549>
- Nulkar, G. (2024). Traditional knowledge and sustainable livelihoods. En G. Nulkar (ed.), *The economics of sustainable development* (pp. 129-176). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7379-8_4
- Pielou, E. C. (1966). The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 13(2), 131-144. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(66\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0)

- Pontes Junior, V. B.; Alberto da Silva, A.; D'Antonino, L.; Mendes, K. F. & De Paula Medeiros, B. A. (2022). Methods of control and integrated management of weeds in agriculture. En K. F. Mendes, A. Da Silva (eds.), *Applied weed and herbicide science* (pp. 127-156). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-01938-8_4
- Ramos, O.; Vaquero, R.; León, R. & Ayuso, F. (2011). Efecto de tres especies de cobertura viva en el control de malezas en una plantación de banano orgánico (*Musa AAA* cv. Williams). *Tierra Tropical*, 7(1), 1-10. <https://xdoc.mx/preview/articulo-en-espaol-5dd841f9301d6>
- Restuccia, A.; Scavo, A.; Lombardo, S.; Pandino, G.; Fontanazza, S.; Anastasi, U.; Abbate, C. & Mauromicale, G. (2020). Long-term effect of cover crops on species abundance and diversity of weed flora. *Plants*, 9(11), 1506. <https://doi.org/10.3390/plants9111506>
- Rivera-Ramírez, I.; Ríos-De la Cruz, A.; Bravo-Avilez, D.; Bernal-Ramírez, L.; Velázquez-Cárdenas, Y.; Santiago-Gómez, J.; Lozada-Pérez, L. & Rendón-Aguilar, B. (2021). Riqueza, abundancia y composición de arvenses en parcelas sujetas a diferentes prácticas agrícolas en la Alcaldía de Cuajimalpa, Ciudad de México. *Etnobiología*, 19(1), 129-125. <https://www.revistaetnobiologia.mx/index.php/etno/article/view/408>
- Romanekas, K.; Kimbirauskienė, R.; Sinkevičienė, A.; Jaskulska, I.; Buragienė, S.; Adamavičienė, A. & Šarauskis, E. (2021). Weed diversity, abundance, and seedbank in differently tilled faba bean (*Vicia faba* L.) cultivations. *Agronomy*, 11(3), 529. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030529>
- Sánchez-Reyes, G. A.; Vibrans, H. & Rendón-Aguilar, B. (2024). How do farming practices influence the richness and floristic composition of weeds in some Mexican maize fields? *Discover Agriculture*, 2, 122. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00134-y>
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature*, 163, 688. <https://doi.org/10.1038/163688a0>
- Sørensen, T. (1948). A method of establishing groups of equal amplitude in plant sociology based on similarity of species content. *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab Biologiske Skrifter*, 5(4), 1-34.



Acta Agronómica



Revista Acta Agronómica

Página web: http://bit.ly/Acta_Agronomica_UNpal
ISSN 0120-2812 | e-ISSN 2323-0118
actagronomica_pal@unal.edu.co

Universidad Nacional de Colombia - Sede Palmira
www.palmira.unal.edu.co

Carrera 32 # 12-00, Edificio posgrados, 2^{do} piso
57 (2) 286 8888 Ext.: 35190
Palmira, Valle del Cauca, Colombia, Suramérica